



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Építőmérnöki Kar**

**ASZFALTVIZSGÁLATOK CT-VEL  
(COMPUTER TOMOGRÁFIÁVAL)**

**Készítette: Németh Szandra**

**Konzulensek: Dr. Lublós Éva**

**Dr. Kapitány  
Kristóf**

**Budapest, 2017.**

# TARTALOM

Tartalom .....	2
1. Bevezetés.....	3
2. Aszfalt és útpályaszerkezet .....	5
2.1. Aszfalt jellemzői.....	5
2.2. Útpályaszerkezet felépítése .....	7
3. Laboratóriumi aszfaltvizsgálatok.....	9
3.1. Hézagtartalom, MSZ EN 12697-8 [14] szerint .....	9
3.2. Szemeloszlás, MSZ EN 12697-2 [16] szerint .....	9
3.3. Bitumentartalom MSZ EN 12697-39 [19] szerint .....	10
3.4. Deformációs hajlam (nyomvályúsodás) MSZ EN 12697-22 [21] szerint .....	11
4. Vizsgálatok CT-vel.....	13
4.1. A CT működése.....	13
4.2. Aszfalt vizsgálat CT-vel.....	15
5. Saját kísérleteink .....	23
5.1. Laboratóriumi mérések .....	23
5.2. Aszfalt próbatestek mérése CT-vel.....	25
5.2.1. Réteghatár vizsgálata .....	26
5.2.2. Adalékanyag tartalom és hézagtartalom meghatározása.....	27
5.2.3. Bedolgozási hibák kimutatása .....	27
5.2.4. Útpálya szerkezetek állapotának nyomon követése .....	28
6. Eredmények összehasonlítása.....	28
7. ÖSSZEGZÉS.....	33
8. Irodalomjegyzék .....	34

## 1. BEVEZETÉS

Világunkban az útpályákon végbemenő forgalom jelentősége nem megkérdőjelezhető. A motorizáció és a modern útburkolat megjelenése egymásból következett, hiszen a gyorsuló és egyre könnyebbé váló belföldi szállítás megkövetelte az egyre jobb és hosszú távon is megfelelő útburkolatok létrehozását. Az elmúlt időszak forgalomfejlődése, főként a tehergépjármű forgalom mennyiségre vonatkozó változások, együtt jártak és járnak az útpályaszerkezetek igénybevételenek drasztikus növekedésével. Így nagy jelentősége van annak, hogy megismerjük a modern útpályaszerkezetekbe tervezett és épített aszfaltrétegek mechanikai és egyéb az élettartamát befolyásoló tulajdonságait. Az aszfaltburkolat minősége a mindennapi forgalom életében meghatározza a közlekedés minőségét. Minden a közúti közlekedésben résztvevő járműre hatással van, vagyis a rossz útburkolat vagyoni és élettani kockázatot is jelent egyben. A környezeti hatások és a használattal járó hatások azonban mind lerontják az út felületét, vagy akár az alatta lévő útburkolati réteget is károsítják. Nem csak a szélsőséges környezeti hatások roncsolják az aszfalt szerkezetét, hanem már a gyakori hőingadozás és a repedésekben megjelenő csapadék is. Ezt a folyamatot preventív jelleggel érdemes kezelni. A cél, hogy minél jobb minőségű aszfalt előállításával tudjuk megőrizni az útburkolat felületét és szerkezeti egységét. Kiemelt fontosságú a már meglévő aszfalt folyamatos vizsgálata is. Ezekkel a vizsgálatokkal lehet megállapítani az adott szakaszon mennyire volt jó döntés az adott összetételű aszfalt, hogyan alkalmazkodik az adott helyen lévő mikroklímához, illetve a forgalmi viszonyokhoz. Fontos, hogy a kivitelezés során milyen minőségű útfelületet sikerült létrehozni. A világot behálózó úthálózat mérete miatt, nagyon fontos, hogy ezeket a vizsgálatokat milyen sebességgel és pontossággal lehet elvégezni.

Dolgozatomban ezeknek a tulajdonságoknak a feltárásával és az ezekhez már szorosan kapcsolódó laboratóriumi eljárásokról írok. Mindemellett egy új és hatékony eljárást is bemutatok, amelyet már külföldön és Magyarországon is alkalmaznak teszt jelleggel, ez az eljárás pedig az aszfaltburkolatok CT-vel való vizsgálata. Elemezni fogom a magyar és külföldi publikációk egy részét, amelyek eredményt értek el ezzel az új aszfaltvizsgálati módszerrel. Ezt a módszert már a gyakorlatban is használják Magyarországon az M5-ös autópálya vizsgálatok során. A dolgozatom végén az egyes eredményeket összevetem és rendszerezni fogom több szempont alapján. A CT segítségével roncsolásmentesen, besugárzás által a detektorok segítségével jelfeldolgozás után megkapott eredményeken lehet kiértékelni a mintadarabot. Megfelelő berendezés segítségével tudjuk vizsgálni az aszfalt mikroszerkezetét. A CT vizsgálatok kitérnek például az aszfalt szemeloszlásának, légpórus térfogatának meghatározására valamint a víz terjedését is megismerhetjük az aszfalt mikroszerkezetében.

Az aszfalt vizsgálatokat több módon, vagy már a keverék elkészítésekor laboratóriumban elemzik, vagy már meglévő burkolatból vett mintát vizsgálnak meg. Ezek a vizsgálatok a mintadarab összetételét határozzák meg. Továbbá az elemzés kitér a szerkezeti tulajdonságokra, így a hézagtartalomra és a nyomvályú kialakulásának lehetőségére. Látható, hogy sok mindentől függ, ami alapján meg lehet határozni egy aszfaltburkolat minőségét. Nehéz úgy elvégezni a laboratóriumi vizsgálatokat, hogy közbe ne roncsolnánk meg a mintadarabot, ami befolyásolhatja a mérés eredményét. Vagy magáról a szabványos mérésről

tudjuk, hogy bizonyos hibaszázalékkal dolgozik, esetleg vannak olyan állapotok, amelyek esetében nem működik az adott típusú vizsgálat. A CT-vel való mérés így ezeknek a pontosítására és továbbfejlesztésére is törekszik.

Az általam feldolgozott új vizsgálatokat csoportosítom a vizsgált tulajdonság alapján, és röviden ismertetem az ehhez szükséges technikai háttérrel. Ez a technikai háttér az informatikának egy speciális ágából merítkezik, amely a CT képek digitális feldolgozásán alapul. Majd az egyetemi munkát – a konzulenseim által végzett – méréseket mutatom be, és röviden kiértékelem az ott kapott eredményeket. Dolgozatomban végén pedig kitérek az aszfaltvizsgálatok lehetséges jövőképeire.

## 2. ASZFALT ÉS ÚTPÁLYASZERKEZET

### 2.1. Aszfalt jellemzői

Az aszfalt ásványi adalékanyagokból és fekete kötőanyagból, bitumenből készített pályaszerkezeti réteg. Az aszfaltot elsősorban közutak hajlékony és félmerev pályaszerkezetének készítéséhez, valamint a talajvíz elleni védelemre, védőréteggént alkalmazzák az építőiparban.

Az aszfaltokat csoportosíthatjuk az előállítás technológiája szerint:

- permetezéssel, szórásos eljárással készülő aszfalt, például a felületi bevonat,
- keveréssel-terítéssel eljárással készülő, például SlurrySeal, Micro Seal,
- keveréssel, tömörítéssel készülő, például aszfaltbeton, zúzalékvázás masztixaszfalt.

Továbbá az aszfalt készítésénél alkalmazott hőmérséklettől függően:

- hideg eljárással (Cold Mix), ezeknek a kötőanyagok: bitumenemulzió vagy modifikált bitumenemulzió,
- a félmeleg eljárással (HalfWarm Mix) 80 – 120°C-on beépített, a felületi bevonatokra és a makadám burkolatokra jellemző,
- mérsékelt meleg eljárás (Warm Mix), 120 – 140°C-on építik be,
- meleg eljárással (Hot Mix), 160 – 210°C hőmérsékleten gyártják a burkolatkészítésnél általánosan használt hengerelt aszfaltokat,
- forró eljárással 180 – 240°C-on öntött-vagy masztixaszfaltokat gyártanak, ezek önterülő, de hőérzékenyséjük nagyobb az előzőeknél.

A bitumen ásványolaj lepárlása után visszamaradó fekete termoplasztikus szénhidrogén elegy. A bitument az útépitésben aszfaltburkolatok készítéséhez, illetve az útfenntartás területén használják. Ez a természetben is előfordulhat, azonban aszfalt készítésére nagyrészt a kőolaj feldolgozásából nyert, mesterséges bitument használják. Aszfaltkeverékekben az útépitési bitumenek, nagy modulusú bitumenek illetve a polimerrel modifikált bitumenek jelenhetnek meg.

A bitumen fizikai tulajdonságainak vizsgálata nagyon fontos, ezért ezeket az eljárásokat ismertetem. A bitumen penetrációs tulajdonsága egyben a konzisztencia jellemzője. A vizsgálat során egy 25°C-on lévő bitumen mintába egy 100 gramm terhelésű tűt engednek bele, és 5 másodperc alatt nézik a tű behatolásának mélységét. A vizsgálat az aszfalt fáradással szembeni ellenállását mutatja be.

A lágyuláspont vizsgálatának elve, hogy két sárgaréz gyűrűbe öntött bitumenes kötőanyagból készített vízszintes korongot folyadékfürdőben, ellenőrzött körülmények között melegítünk úgy, hogy a felületükre egy-egy acélgolyót helyezünk. Lágyuláspontként azoknak a hőmérsékleteknek a középértékét adjuk meg, amelyen a két korong annyira meglágyul, hogy a bitumenes kötőanyagba ágyazódott golyó  $25,0 \pm 0,4$  mm mélyre süllyed. Ez a vizsgálat a minta meleggel szembeni viselkedését adja meg, vagyis, hogy az aszfalt mennyire lesz ellenálló a deformációkkal szemben.

A bitumenek töréspontja Fraas-féle készülékkel mérve az a hőmérséklet, amelyen a szabványos méretű acéllemeze olvasztott, egyenletesen felvitt bitumenréteg megadott mértékben, egy irányban hajtogatva rideg lesz és eltörik. Ez a vizsgálat a minta hideggel szembeni viselkedését mutatja be, vagyis, hogy az aszfalt mennyire ellenálló a repedésekkel szemben.

A bitumen duktilitása az a megnyúlás, amelynél 25°C-os vízben, adott sebességgel nyújtott minta elszakad. Ez a vizsgálat arra mutat rá, hogy a bitumenminta mennyire lágy, vagy, kemény [1].

Az útépítési bitumenekkel szemben támasztott általános követelmények:

- kötőképességét és rugalmasságát hosszú ideig tartsa meg,
- alacsony hőmérsékleten ne váljon rideggé, magas hőmérsékleten túlzottan ne lágyuljon meg (hőérzékenység),
- jó tapadó képesség (az többi anyag felületéhez).

Az egyes útépítési bitumeneket egyrészt a keverék előállítási módja, másrészt a burkolat gyártási technológiája, és azon belül is a terítési hőmérséklete határozza meg. Ilyenek lehetnek például:

- útépítési bitumen vagy útbitumen: Ez a bitumenfajta szobahőmérsékleten szilárd halmazállapotú. Kevert aszfaltokhoz, a meleg- és forró eljárásos technológiáknál használják,
- hígított bitumen: Az útépítési bitumenből állítják elő, magas hőmérsékleten oldószer (gázolaj, petróleum, kerozin stb.) adagolásával. A hígított bitumen hideg vagy félmeleg eljárásokhoz és felújítási munkákhoz használható, de a hígításhoz felhasznált oldószer tűzveszélyessége miatt napjainkban egyre ritkábban alkalmazzák.
- modifikált bitumen: Az útépítési bitumenből készítik, különböző adalékokkal (polimerek, gumiadalékok) megváltoztatva a bitumen egyes tulajdonságait (pl.: töréspont csökkentése, tapadás javítása),
- bitumenemulzió: A közettel érintkezve az emulzióban lévő bitumen elektrokémiai kötással, jó tapadással vonja be az ásványi szemcséket [2].

Az aszfalt adalékanyaga elsősorban zúzott vulkanikus eredetű kőanyag (andezit, bazalt) és homok. Egy adott útépítési feladathoz felhasználható zúzottkő termékekkel szembeni követelményeket a forgalmi terhelés, illetve az adott pályaszerkezeti réteg helye (alap-, kötő- vagy kopóréteg) szabja meg. Az aszfaltok készítésénél sokszor alkalmaznak segédanyagként úgynevezett fillert, igen apró szemmagyságú mészkőlisztet, homoklisztet.

Az útépítésben használt kőanyagok szemeloszlás csoportosítása szerint megkülönböztetjük:

- durva frakció  $D_{\max} > 2 \text{ mm}$ ,
- finomfrakció  $0,063 \text{ mm} < D_{\max} < 2 \text{ mm}$ ,
- töltőanyag  $D_{\max} < 0,063 \text{ mm}$ .

Kőanyagként Magyarországon legtöbbször bazalt vagy andezit zúzottkővet használnak, de előfordul a dolomit, mészkő, vagy zúzott kavics alkalmazása is. Finomfrakcióként

természetes vagy zúzott homokot alkalmaznak, melyek nem tartalmazhatnak szerves szennyeződést, illetve agyag-iszap tartalmuk 5%-nál kevesebb kell, hogy legyen. Töltőanyagként mészköliszt és a keverőgép által elszívott saját töltőanyag – exhausztor por – használható fel.

Az adalékanyagokkal szemben támasztott követelmények:

- megfelelő ütőszilárdság,
- megfelelő kopószilárdság,
- megfelelő időállóság.

A CEN (Európai Szabványügyi Bizottság) tagság hazánkat arra kötelezi, hogy az európai szabványokat a megjelenést követő hat hónapon belül honosítsa, és az ellentmondó régi nemzeti, és korábbi európai szabványokat visszavonja. Így az aszfaltok, a betonok gyártásához, illetve az alsó útalap rétegek gyártásához-építéséhez használható kőtermékekre vonatkozó EN- szabványokat kell alkalmazni (1. táblázat).

<b>MSZ EN 13108-1 [3]</b>	Aszfaltbetonok (Kopó- kötő- és alapréteg típusok) [AC]
<b>MSZ EN 13108-2 [4]</b>	Aszfaltbetonok nagyon vékony rétegekhez [BBTM]
<b>MSZ EN 13108-3 [5]</b>	Lágy aszfalt [SA]
<b>MSZ EN 13108-4 [6]</b>	Érdesített homokaszfalt [HRA]
<b>MSZ EN 13108-5 [7]</b>	Zúzalékvázaz masztixaszfalt [SMA]
<b>MSZ EN 13108-6 [8]</b>	Öntöttaszfalt [MA]
<b>MSZ EN 13108-7 [9]</b>	Porózus aszfalt [PA]
<b>MSZ EN 13108-8 [10]</b>	Visszanyert aszfalt [RA]

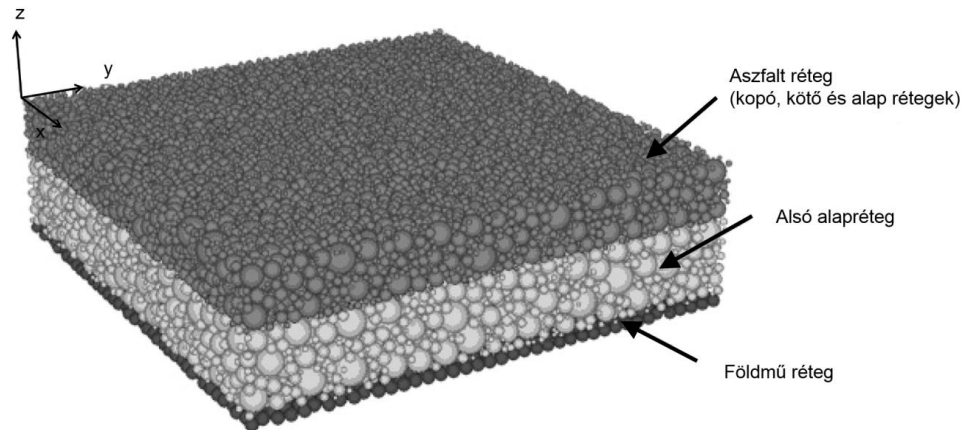
1. táblázat: Az útépitési aszfaltkeverékekre vonatkozó termék-szabványok: szabvány száma - szabvány megnevezése

## 2.2. Útpályaszerkezet felépítése

A pályaszerkezetek feladata a forgalom számára alkalmas és biztonságos burkolatfelület létesítése úgy, hogy a járműterhelések okozta feszültségek, alakváltozások, valamint a klimatikus hatások az útpályaszerkezet egyes rétegein fokozatosan lecsökkenjenek, így a pályaszerkezetet alátámasztó földműre már csak tartósan elviselhető kis igénybevételek jussanak [11]. A járművek által okozott hatások lehetnek függőleges statikus, dinamikus terhek, valamint vízszintes erőhatások, amik a fékezéssel és gyorsítással alakulnak ki. A klimatikus hatásokat pedig a hőmérséklet, napsugárzás és a víztartalom adja.

Az útpályaszerkezet fő elemei (1. ábra):

- burkolat (aszfaltrétegek vagy betonburkolat),
- burkolatalap (alaprétegek),
- földmű (szükség szerint fagyvédő és/vagy javító rétegekkel).

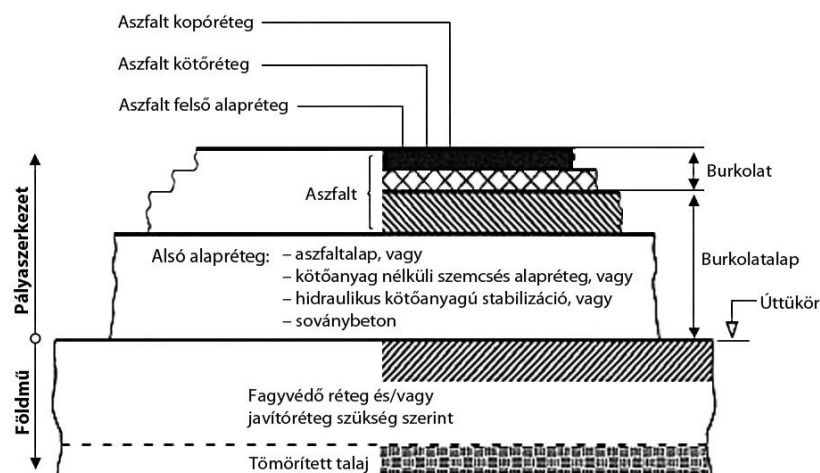


1. ábra: Hajlékony vagy félmerev útpályaszerkezet modellje [12]

Pályaszerkezetek szempontjából megkülönböztetünk merev, félmerev és hajlékony típust. Merev pályaszerkezet esetén a földműre hidraulikus kötésű alapréteget és beton burkolatot tesznek, így ezzel ebben a dolgozatban nem foglalkozom. A félmerev és hajlékony pályaszerkezet felépítése úgy néz ki, hogy a földműre aszfaltalapot, hidraulikus kötésű stabilizációt, kötőanyag nélküli szemcsés alapréteget vagy soványbetont tesznek, majd erre kerül az aszfalt burkolat.

A hajlékony és félmerev pályaszerkezetek az alábbi rétegrendet alkalmazzák (2. ábra):

- 3 – 5 cm aszfalt kopóréteg,
- 5 - 8 cm aszfalt kötőréteg,
- 15 – 30 cm alapréteg.



2. ábra: Az aszfalt pályaszerkezet rétegei [13]



### 3. LABORATÓRIUMI ASZFALTVIZSGÁLATOK

#### 3.1. Hézagtartalom, MSZ EN 12697-8 [14] szerint

A hézagtartalom vizsgálat elvégzéséhez szükséges ismernünk a minta testsűrűségét és hézagmentes testsűrűségét. A testsűrűség meghatározható az aszfaltminta száraz és telített tömegéből. A hézagmentes testsűrűség elvégzéséhez viszont szükség van a minta roncsolására. Ezért, a vizsgálat előtt a felmelegített Marshall-próbatestet összezúzzuk és kimérünk belőle körülbelül 1800-2000 grammot. Ezt az aszfaltzúzalékot megszáritjuk, majd ha kéz meleg hőmérsékletre hűlt, beleöntjük egy ismert térfogatú piknométerbe és lemérjük. A következő lépés, hogy a piknométert és a benne lévő aszfaltot vízzel feltöltve lemérjük a tömegét. Ezek után 15 percre vákuum alá helyezzük (3. ábra), aztán diszpergálószerrel adunk hozzá és összekeverjük, úgy, hogy a lehető legkevesebb légbuborék maradjon benne. A következő lépés, hogy ismert hőmérsékletű vízfürdőbe helyezük és megvárjuk, míg a piknométerben lévő víz is felmelegszik erre a hőfokra. Ha ez megtörtént, újra lemérjük a tömegét, majd a kapott eredményekből kiszámítjuk a hézagmentes testsűrűséget. A testsűrűség és a hézagmentes testsűrűség ismeretében a hézagtartalom is számolható.



3. ábra: Piknométer és vákuumedény [15]

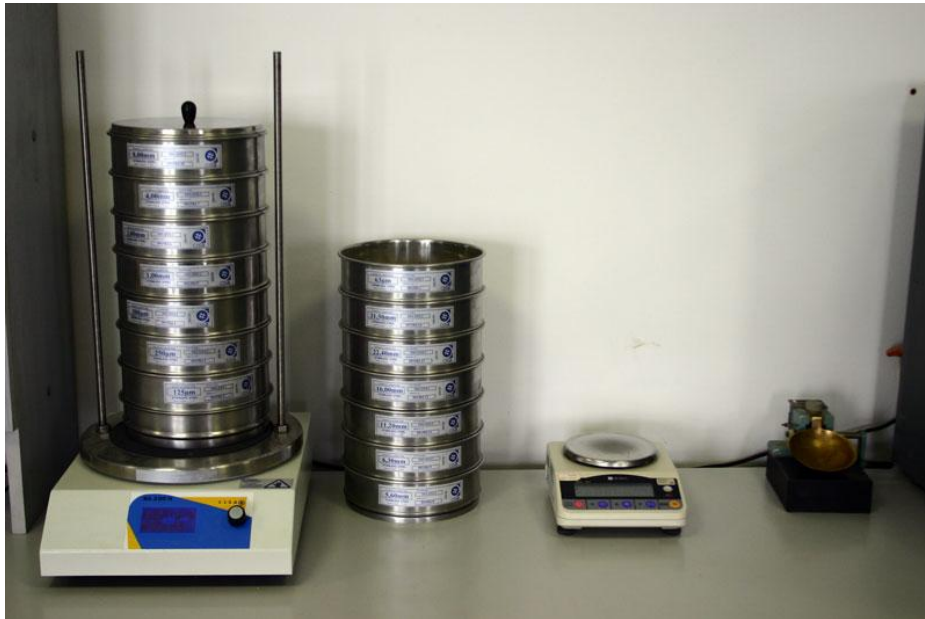
#### 3.2. Szemeloszlás, MSZ EN 12697-2 [16] szerint

A szemeloszlás a szemhalmazok fontos geometriai tulajdonsága, amely a szemnagyság szerinti összetétel kifejezője. A szemeloszlás elméletileg valamely szemnagyságnál kisebb szemek tömegének az összes szem tömegéhez viszonyított hányadosa tömegarányban, vagy tömegszázalékban kifejezve. A szemnagyság meghatározása 0,063 mm szemnagyság felett szitavizsgálatot, 0,063 mm alatt pedig ülepités vizsgálatot használnak [17].

A szemeloszlás vizsgálatához használható szitator, az alap szitator +1-es készletnek megfelelően, mm-ben:

0,063; 0,125; 0,25; 0,50; 1; 2; 4; 5,6; 8; 11,2; 16; 22,4; 31,5; 45; 63; 90.

A vizsgálni kívánt kőanyagokat folyamatosan működő rezgő szitatorral vagy kézzel szitáljuk le (4. ábra). Az egyes szitákon fennmaradt anyagot lemérjük, majd ebből előállíthatjuk a szemeloszlási görbét.



4. ábra: Szitator és szitatózó készülék [18]

### 3.3. Bitumentartalom MSZ EN 12697-39 [19] szerint

Az aszfaltok bitumentartalmának meghatározására napjainkban két módszer van:

- égetéses módszer,
- extrahálással történő bitumentartalom meghatározás.

Az égetéses módszer alapja, hogy az aszfaltkeverékből magas hőfokon, égetéssel eltávolítjuk a kötőanyagot, majd a visszamaradó tömeg mennyisége alapján meghatározható a bitumen százalékos tartalma.

A bitumentartalom meghatározó készülék egy duplafalú kemencéből és egy beépített mérleg egységből áll (5. ábra), mely folyamatosan méri és regisztrálja a bitumenes aszfalt keverék súlyvesztését az égetési folyamat alatt, majd automatikusan kalkulálja a kötőanyag tartalmat a teszt végén. A kemencébe beépített mérlegen maximálisan 5000 gramm minta tesztelhető egyszerre, viszont általában 1200-1800 grammot tesztelünk egy vizsgálat során. A berendezés hőmérsékleti tartománya 200 °C és 650 °C között mozog. A vizsgálat időtartama 30 - 40 perc (1200 – 1800 gramm minta esetén) [20].

Az oldható kötőanyag tartalom elvén működő extraháló módszernek három fő típusa van:

- meleg extrahálással 1 (Benson féle extraháló berendezés),
- meleg extrahálással 2 (gyors extraháló berendezés – analizátor),
- hideg extrahálással (centrifugás extraháló berendezés).

Hátrányuk, hogy a vizsgálatok elvégzéséhez a környezetre és a felhasználó egészségére káros, rákkeltő oldószert kell használni. Ez az oldószer a triklór-etilén, aminek használatát az egész világon csökkenteni szeretnék.



5. ábra: NCAT típusú égetéssel bitumentartalom meghatározó készülék [20]

### 3.4. Deformációs hajlam (nyomvályúsodás) MSZ EN 12697-22 [21] szerint

A vizsgálat során az aszfaltkeverék deformációval szembeni ellenálló képességére következtethetünk. A vizsgáló eszköz segítségével az aszfalt burkolat hőmérséklet és nyomás hatására bekövetkező deformációja mérhető (6. ábra). Használható helyszíni mintavételből származó vagy laboratóriumban készített mintákon is 80 mm vastagságig. A körbebetonozott próbatesteket maximálisan 75°C-on, 10.000 ciklussal – vagyis 20.000 kerékáthaladással – terheljük, majd az így kapott nyomvályú mélységét minősítjük az előírt határértékek alapján [20].



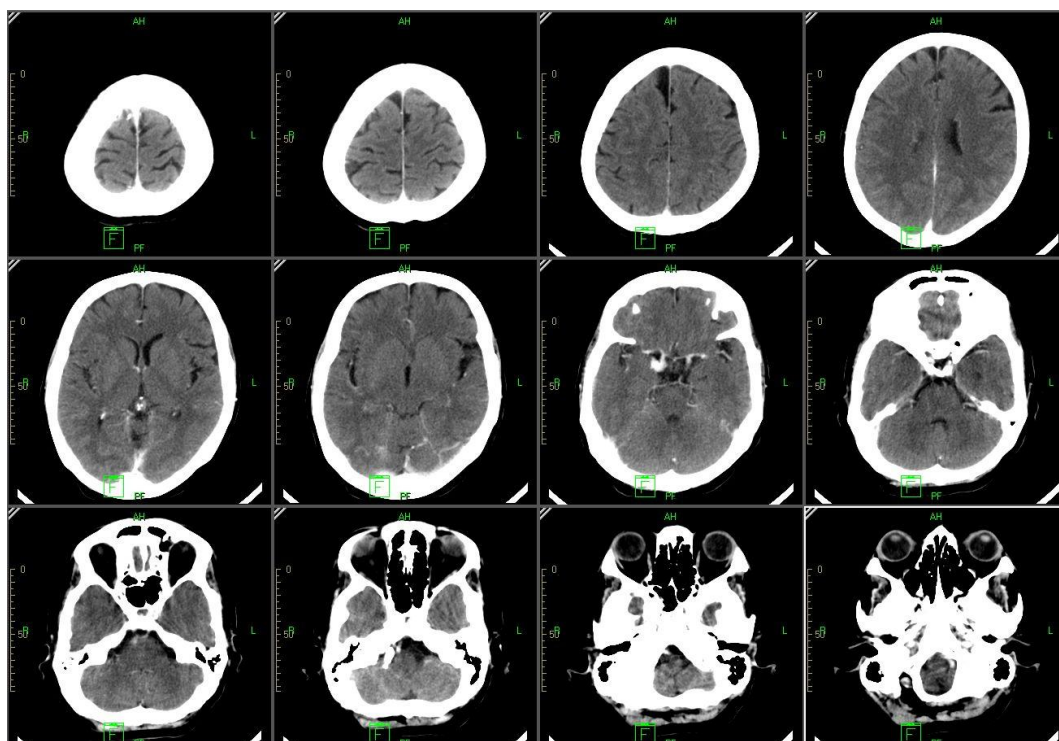
6. ábra: Nyomvályúsodást vizsgáló készülék [20]

## 4. VIZSGÁLATOK CT-VEL

### 4.1. A CT működése

Ha meg akarjuk vizsgálni egy objektum belső struktúráját és felépítését (becslést szeretnénk mondani az anyagokról, amikből felépül), de nem szeretnénk roncsolni se az anyag szerkezetét, se a benne lévő anyagokat, akkor korlátozott az eszköztárunk, amit bevethetünk. Ha a vizsgált objektumnak nem csak a felületét, hanem 2D – 3D tulajdonságait is tudni szeretnénk, ebben az esetben jó megoldást nyújthat a CT. A CT, azaz a komputertomográfia ezért jött létre, hogy síkszerű röntgensugár nyalábbal információt szerezzünk az objektum belső tulajdonságairól. Ez a radiológiai diagnosztika egyik ága, amely számítógép segítségével térben rekonstruálja a vizsgált mintát.

A komputertomográfiát elsősorban orvosi vizsgálatokra használják. Ma már nem kérdés, hogy ha részletes képet szeretne kapni a szakorvos páciense egyik szervéről, akkor fejlett diagnosztikai eszközöket használ. Ezek közül az egyik legkiemelkedőbb a CT készülék. Alkalmazását az 1970-es években kezdték el, azonban ekkor még rendkívül fejletlen, homályos képet eredményezett a vizsgálat, mely hosszú idő alatt készült el. A készített felvételek minősége, és a vizsgálat ideje meg sem közelítette a mai szintet. 80×80 felbontású képek készültek, öt percet igényelt a rögzítése egy-egy képkockának. Összehasonlításként ma körülbelül 1024\*1024 mátrixú képeket szeletenként akár 0,3 másodperc alatt tudnak a szakorvosok készíteni (7. ábra) [22].



7. ábra: Koponya CT felvétele [23]

Felmerül a kérdés, hogy vajon működhet-e ez a vizsgálati módszer építőanyagokon is, nem csak emberi testeken. A válasz igen, bár az építőanyagok sűrűségtartománya más, mint az emberi testé, viszont nagyban közelíti a csontok sűrűségét. Így lehet az, hogy eredményes vizsgálatokat végezhetnek, például aszfaltmintákon is.

A komputertomográfia működésének elméleti alapja a következő: a vizsgált objektumot számos pozícióban röntgensugárral világítják át (projekciók) és az átvilágítás másik végén pedig detektorok fogadják az objektumon áthaladt jeleket, majd numerikus formában tárolják (intenzitás görbe). Ez az eljárás a sugárgyengítési törvényen alapul, amely kimondja, hogy a testből kilépő sugárzás intenzitása függ a test sugárgyengítési együtthatójától, a vizsgált objektum vastagságától és természetesen a testbe belépő sugárzás nagyságától.

$$I = I_0 * e^{-\mu d},$$

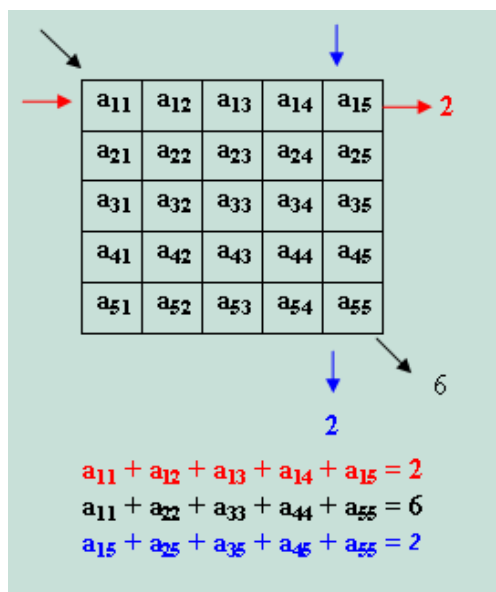
ahol:

I a testből kilépő sugárzás intenzitása,  
 $I_0$  a testbe belépő sugárzás intenzitása,  
e a természetes logaritmus alapja,  
 $\mu$  a sugárgyengítési együttható,  
d a vizsgált objektum vastagsága.

Az egyes projekciókból kapott intenzitás görbe a vizsgált test egy metszetének egydimenziós képe. A több projekcióból kapott intenzitásgörbék feldolgozása után (filtered backprojection) kapjuk meg a vizsgált test egy adott szeletének kétdimenziós képét. Ez a kép a számítástechnikában egy mátrixnak feleltethető meg, amelynek egyes elemei a testen mért térfogategység sugárgyengítésének felel meg. A képrekonstrukció során a képmátrix egyes elemeit (az anyag 2D metszetének darabjai pixel szinten) ismeretleneknek feltételezzük. Az intenzitásgörbék által kapott értékek és a képmátrix egyes sorai/oszlopai között meghatározunk egy összefüggést, amelyet megoldva kapjuk meg az egyes mátrixelemek valódi értékét (8. ábra). Ha kellően túlhatározott az egyenletrendszer, akkor az egyes mátrixelemek ekként könnyen meghatározhatóak.

A kép feldolgozása során számos szűrőt alkalmaznak, azért, hogy javítsák a képminőséget, mert a rekonstrukció közben zavaró árnyékok jelenhetnek meg a képen, továbbá elmosódások képződhetnek (például a CT mozgása miatt). Ezeket az eljárásokat a vizsgált objektum tudtában speciálisan arra a felhasználásra állítják be.





8. ábra: Az egyenletek számítása [24]

Vagyis a képmátrixban található numerikus értékeket finomítva és átskálázva kapjuk meg a szürkeárnyalatos CT felvételt. Számos felvételt készítve a minta több keresztmetszete is előállítható, így háromdimenziós modelltől is beszélhetünk. A felvételen egy pixel a CT felbontásának felel meg, vagyis ez a pixel a valóságban arányos a minta adott térfogategységével (voxel a szelettávolságnak megfelelően). Ebből kifolyólag minél részletesebb az adott CT készülék képmátrixa, annál nagyobb felbontáson (mm) ismerjük meg a vizsgált objektum szerkezetét.

Több típusú CT létezik, számos generáció született az 1970-es évek óta. Mind a CT gépek fizikai felépítésében (detektorok száma, elhelyezkedése, pálya, amit bejár, stb.), mind a CT által kapott eredmények feldolgozásában sok változatos megoldás született. A cél, hogy a vizsgált anyagnak - jelen esetben az aszfalt mintának - megfelelő gépet és eljárást válasszuk ki [25].

A CT vizsgálatok számos előnnyel rendelkeznek az aszfaltminták vizsgálatában. Ilyen előny, hogy roncsolásmentesen vizsgálja az adott mintát és nagy felbontású, akár háromdimenziós modellt kaphatunk a mintáról.

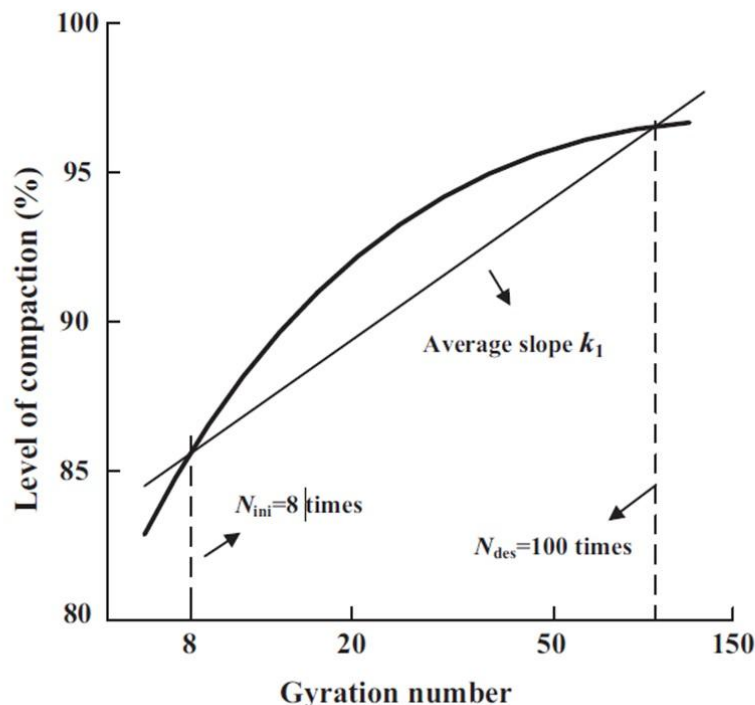
#### 4.2 Aszfalt vizsgálat CT-vel

Az utóbbi időkben egyre több egyetem és kutatólabor is foglalkozott az különböző aszfaltok tomográfiás vizsgálatával. Ezért több külföldi publikációból is tudtam válogatni, amelyek különböző eredményeket értek el ezen a területen. Összesen hat darab idegen nyelvű publikációt választottam ki, amelyek segítségével áttekintettem az elért eredményeket, illetve, hogy, melyek azok az irányok, amik felé haladnak a kutatások. A választásaimat több szempont is befolyásolta. Ilyen volt például, hogy számos különböző módszerrel készült aszfalt is legyen a vizsgálatok között. A [26] (Chen Zang et. al.) és a [27] (Magdy Shaheen et. al.) például hot mix aszfaltot (HMA) használnak, míg a [28] (Hainian Wang et. al.) publikáció

újrahasznosított gumi adalékanyagú aszfaltot használ, de van olyan is, amelyben hideg helyben újrahasznosított aszfaltot vizsgálnak [29] (Lei Gao et. al.). Ezáltal vannak olyan munkák, amelyek laboratóriumban előállított próbatesteket használnak [26; 27; 31] (Chen Zang et. al., Magdy Shaheen et. al., Xu Huining et. al.), és van olyan, amelyek meglévő útpályaszerkezetről kerültek be vizsgálati mintáknak. A tanulmányok több próbatestet is használnak a mérések során, ezek a próbatestek jellemzően az adalékanyagokban illetve kötőanyagukban térnek el egymástól.

Természetesen a vezérfonalat, az aszfalt tulajdonság adja meg, amit mérni szeretnénk. Ebben is vannak átfedések, de törekedtem arra, hogy diverz módon válogassak a vizsgálat tárgya alapján is. Ezeket a cél tulajdonságokat mutatom be az egyes publikációkon keresztül, majd később részletesen elemzem a kidolgozott eljárásokat.

A légpórus vizsgálata gyakran megjelenő igény, ezzel foglalkozik több tanulmány is [26; 27, 29] (Chen Zang et. al., Magdy Shaheen et. al., Lei Gao et. al.). Így, például a [26] (Chen Zang et. al.) a tömörödési jellemzőit vizsgálja különböző adalékanyag eloszlással girator tömörítő segítségével. A tömörödési jellemzők hatással vannak az aszfaltkeverék bedolgozhatóságára. A tömörödés során létrejövő térfogatváltozás a tömörítés alatt és az úthasználat időtartama alatt is létrejöhethet. Az SGC módszert (girator tömörítő) arra használták, hogy elemezze az aszfaltkeverékek tömörödési jellemzőit. A kísérlet egy tömörödési görbét használ, ennek segítségével értékeli a térfogati jellemzőket az aszfaltban. A görbe (9. ábra) 2 szakaszra osztható: kezdeti és tervezett tömörödéssre.



9. ábra: Tömörödési görbe [26]

A kutatás arra fókuszál, hogy meghatározza az aszfaltkeverékek tömörödési jellemzőit a tervezési szakaszban. Ezzel ellentétben a cikk írói megjegyzik, hogy az aktuális kutatások



inkább az aszfaltok keverési módjára fókuszálnak, és nem a tömörítés módjára, ezért is érdekes más aspektusból tekinteni a problémára. A kutatás [26] (Cheng Zang et. al.) célja, hogy meghatározzák az aszfaltkeverékek tömörödési jellemzőit a mikroszerkezet elemzésének segítségével. Vagyis a légpórusok meghatározása és ezzel együtt a tömörödési jellemzők meghatározására fókuszál az általuk kidolgozott eljárás. A [27] (Magdy Shaheen et. al.) szerint a HMA fáradási tönkremenetelét vizsgálja, amelyről kimutatja, hogy szoros összefüggésben van az aszfaltban megtalálható légpórus eloszlásával. Az elemzéseket aszfalt gerendákon végezték el azért, hogy számszerűsítsék a károsodást 4 pontos hajlító vizsgálatnál. Ez némi kitekintés, abból a szempontból, hogy itt nem útburkolatból vett aszfaltot vizsgálnak, hanem aszfalt gerendákat, de fontos eredményeket érnek el a CT vizsgálatok fejlesztésében. Megállapítást tesznek, hogy a légpórus eloszlását befolyásolja az adalékanyag eloszlása, a tömörítő típusa és a tömörítés mértéke. Végül ebben a témakörben az utolsó [29] (Lei Gao et. al.), amely a világon egyre jobban elterjedő aszfalt típust használ. Ez a hideg, helyben újrahasznosított adalékanyagú aszfaltburkolat, ahol 100%-ban visszanyert aszfaltot építenek be útburkolatként. Az eljárás során először az újrahasznosítandó anyagot felmarják, később összekeverik vízzel, emulzióval és további adalékszerekkel, majd ezzel az új anyaggal újraburkolják a pályát. Ezt a módszert használhatjuk felületi egyenetlenség kezelésére, vagy repedés, kátyú és nyomvályú megszüntetésére, illetve akár új, javított felületet is adhatunk a pályaszerkezetnek. Fontos paramétere az eljárásnak a légpórusok karakterisztikájának vizsgálata az aszfalt szerkezetében. Vagyis ezek térfogatának és számosságának a vizsgálata, a hideg, helyben újrahasznosított aszfaltburkolatokban. Ezt CT segítségével próbálták megbecsülni, számítógépes képfeldolgozó algoritmusok használatával, illetve próbálták modellezni ezeknek a légpórusoknak az eloszlását Weibull eloszlás [33] függvény segítségével.

A másik fontos tulajdonság a szemeloszlás mérése, amelyet a [28] (Hainian Wang et. al.) publikációban dolgoztak ki részletesen. Itt újrahasznosított adalékanyagú aszfalt burkolatot használtak. Talán egyértelműen következik az állítás, miszerint az aszfalt mikroszerkezeti jellemzői nagy befolyással vannak a makro-mechanikai teljesítményére. Ez a tanulmány, a szemeloszlást, az újrahasznosított aszfalt mennyiségét és a meleg aszfaltkeverék réteg vastagságát vizsgálja CT szkennelés és az Image Pro Plus [34] szoftver segítségével. Az újrahasznosított adalékanyagú meleg aszfaltkeverékek használata csökkenti a környezetszennyezést, azonban az alacsony hőmérsékletű bedolgozás nem jó az újrahasznosított adalékanyagú meleg aszfaltkeverékek alkalmazásánál. Néhány kutatás [30] (Tao Liu et al.) kimutatta, hogy az újrahasznosított bitumen merevsége növelheti a keverék repedési hajlamát. Ezen kívül a fáradási repedés és az alacsony hőmérséklet miatti repedés megjelenését befolyásolja az újrahasznosított aszfaltkeverék összetétele. Korábbi kutatásokból [32] (Hainian Wang et. al.) tudjuk, hogy a gumi tartalmú kötőanyagok javíthatják az aszfaltburkolat minőségét pl.: növekvő ellenállás a nyomvályúsodásban, csökkentett forgalmi zaj és kisebb karbantartási költség.

Az utolsó két kutatás ezektől részben eltérő tulajdonságot vizsgál, a [30] (Tao Liu et. al.) az aszfalt homogenitását vizsgálja. Ez a tulajdonsága jelentősen befolyásolja az aszfalt minőségét és tartósságát. Az aszfalt homogenitásának mérésére már eddig is léteztek

különböző eljárások, azonban ezek az aszfalt felületén vizsgálták a homogenitást, de a vertikális, vagyis a szerkezeti homogenitás vizsgálata is fontos. Erre megfelelő eszköz a CT, mivel a CT-vel aszfalt belső szerkezetét is tudjuk vizsgálni illetve ábrázolni (3D modell). Jelen kutatás több célt tűz ki maga elé, ilyenek a CT felvételek minőségének javítása illetve egy mérőszám meghatározása, amelyből lehet következtetni az aszfalt homogenitására.

Talán a legérdekesebb mindközül [31] (Xu Huining et. al.) kutatása, amely a víz terjedését vizsgálja az aszfalt szerkezetében. Az aszfaltburkolatok tartósságára negatív hatással van az aszfaltba beszivárgó víz. Különösképpen az adalékanyagok találkozásánál a légpórusokba felgyülemelő víztömeg, majd annak elpárolgása. Az aszfalt vízdifúziós hatásának megértéséhez szükséges a különböző aszfaltok belső struktúrájának megértése és vizsgálata. A nedvesség okozta kár összefüggésben áll a makro- és különösképpen a mikro-szintű aszfalt szerkezetével, ezért már többen foglalkoztak a víz áramlásának és eloszlásának modellezésével a különböző anyagokban. Ez a tanulmány egy eljárást definiál arra, hogy mérhető legyen a CT segítségével az aszfalt mikroszerkezetébe bejutó nedvesség mennyisége. Majd összehasonlítást végez az ismert értékeken és a mért adatokon, az eljárás során pedig számos paraméter függvényében vizsgálja az eredmények sikerességét.

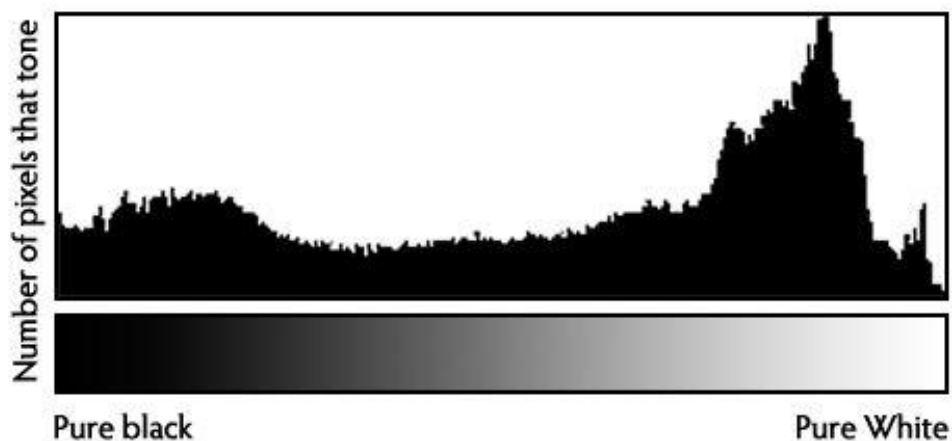
Az aszfalt gerendákat vizsgáló kísérletek esetében [27] (Magdy Shaheen et. al.) függőlegesen helyezték el a mintadarabokat a röntgenforrás és a detektor közé. Mindegyik részt többször szkennelték és a mintákról 360°-os rekonstrukció készült. Ahogy azt a CT működésével kapcsolatban is ismertettem, a létrejövő - rekonstruált - képen az adott pixelen a szín intenzitása függ a mintadarab egyes összetevőinek a tulajdonságától jellemzően a sűrűség értékétől. A sűrűség és a visszaverődési tényező között összefüggés van, és ezt használja ki az általuk lefektetett módszer. A CT által készített képeken utómunkákat végeztek, amelyek egy része egy a képfeldolgozás területén jól ismert eszközt használt: küszöbértékek segítségével való szűrést.

Ez a digitális képelemzés alapvető eszköztárába tartozik, amely veszi a képen mérhető valamely tulajdonságot pl.: a pixelek színintenzitásának az értékét, majd ezeket az intenzitás értékeket csoportosíthatja, vagy akár egyéb tulajdonságokat köthet hozzá, és a feldolgozás során bizonyos küszöbérték alatt vagy felett lévő értékeket figyelmen kívül hagy. Vagyis ezek a küszöbértékek intervallumokba bontják az adott képen mért adatok értékkészletét. Az éldetektáláson át, a szürkeárnyaltos kép készítésén keresztül (10. ábra), szegmentációra is használják ezt az eljárást. Ennek a küszöbértéknek vagy értékeknek a meghatározása lehet manuálisan megadott érték, amely feltételezi, hogy pontosan ismerjük a képet tartalmilag ezért, minden esetben azonos érték választható. Illetve lehet ez az érték adaptívan meghatározott is, amely valamilyen automatizálás után megpróbálja az optimális threshold [35] (küszöbérték) értéket meghatározni.



10. ábra: Kép manipuláció, bináris kép előállítása küszöbérték segítségével [40]

Egy könnyen definiálható példán bemutatnám a thresholding módszert. Vegyünk egy szürkeárnyaltos képet, majd határozzuk meg a histogramját. A kép-histogram [36] ábrázolja a képünk intenzitás eloszlását (11. ábra). Az (x) vízszintes tengelyen vesszük fel a teljes szürkescalát úgy, hogy az origóba kerüljön a fekete, a tengely végén a fehér, közepén pedig a középszürke szerepeljen. A (y) függőleges tengelyen találjuk az adott szürkeárnyalat előfordulásának gyakoriságát az összes képpont arányában. Amennyiben sok képpont képviseli az adott szürkeárnyalatot, a histogramon kiemelkedést látunk. Minél kevesebb ilyen képpont van, annál alacsonyabb értéket mutat a histogram adott x koordinátán. Egy adaptív küszöbérték meghatározás során vehetjük ennek a skálának az átlagát és ahhoz képest határozzuk meg milyen kiugró intenzitás értékeket hagyunk el a képről, vagy a histogram görbe deriváltjaiból határozzuk meg azt, ha „tüskét” találunk benne, akkor az, valamilyen zaj következménye lehetett.



11. ábra: Példa egy szürkeárnyaltos kép histogramjára [41]

Az itt bemutatott kutatás során [27] (Magdy Shaheen et. al.) 3 küszöbértéket is alkalmaztak, hogy azonosítsák a légpórusokat, az adalékanyagokat és a kötőanyagokat. A fő cél természetesen ebben az esetben is az, hogy ezeket a threshold értékeket automatikusan lehessen megállapítani, ne pedig kézi/vizuális visszacsatolás útján keljen finomítani. A légpórus küszöbértékét megállapíthatjuk, ha minimalizáljuk a hibát a laborban mért légpórus tartalom és a feldolgozott képek alapján meghatározott légpórus tartalom alapján. Ez a módszer nem alkalmazható abban az esetben, ha viszkoelasztikus károsodás történik, mert ez nem mindig okoz kárt a légpórusok alakjában. Az elemző algoritmus fejlődését a következőképpen mutatták be:

- A küszöbértéket az adalékanyag szürkeárnyalat intenzitása alapján határozták meg. Az adalékanyag színe a tesztelés alatt nem változott, de a légpórusé és a kötőanyagé a károsodás során változott.

- A javasolt algoritmus széles hatótávolságú színintenzitást használ. Az elemzés 16-bites szürkeárnyalatos képeken történt. Az eljárás az aszfaltkeverékekhez még jobb, mert lehetővé teszi a kis eltérések észlelését a színintenzitásban.

Az eredmények szerint a légpórus eloszlás és károsodás nem egyenletes az aszfalt gerendákban és jelentősen változik a gerenda hosszúságának függvényében. A 8-bites és 16-bites hisztogramok összehasonlítása és a küszöbértékek meghatározása során kimutató, hogy a 16-bites mélységű képek esetében jóval pontosabb eredményeket kaptak. Az adalékanyag, kötőanyag és légpórus 3 mikroszerkezeti összetevő, amiket vizuálisan is megkülönböztethetünk a képeken (világos területek: adalékanyag, sötét területek: légpórus és kötőanyag). A légpórus eloszlás és károsodás az aszfalt gerendákban nem egyenletes a hossz mentén. Az adalékanyag és kötőanyag minősége befolyásolja a gerendák élettartamát.

A jobb megértés érdekében érdemes definiálni, hogy milyen képekkel dolgoznak az egyes publikációk a CT-vel való eljárások során. Az előállt képek lehetnek bináris képek, amelyekben csak kétféle intenzitás érték található. Legegyszerűbben úgy jellemezhető egy pixel, hogy az adott pontban fekete, vagy fehér. Ezek valójában ténylegesen csak bináris képek, de a fekete és fehér képpontok lokális sűrűsége egy-egy szürkeárnyalat illúzióját kelti az emberi szem számára. Ezen felül vannak a tényleges szürkeárnyalatos képek, amelyek nem csupán fekete-fehér képek (hiszen ekkor bináris kép lenne), hanem a kép intenzitása egy skálán mozoghat a fehértől a feketéig. Az hogy ez a skála mekkora, azt mondja meg a képek úgynevezett mélysége [37] (8-bites, 16-bites stb...). 8 bites kép esetében az egyes pixelek [0; 255]-ig terjedő intervallumba vehetnek fel értéket, vagyis ennyi szürkeárnyalt megkülönböztetésére képesek. Általában ezt használják, mert az emberi szemnek már elegendő ennyi féle szürkeárnyalat, hogy kellemesnek vagy jól megkülönböztethetőnek tekintse a képen a tárgyakat, azonban az orvosi képfeldolgozásban, vagy jelen esetben az aszfaltburkolatok vizsgálatában érdemes lehet ennél nagyobb mélységű képek használata.

Ugyanígy a thresholding és a bináris képpé alakítás előnyeit hasznosítja a [29] (Lei Gao et. al.) publikáció, amely az OTSU eljárást [38] használta arra, hogy bináris képeket állítson elő a CT felvételekből. Ezután a légpórusoknak az eloszlását Weibull eloszlás függvény segítségével közelíti. Ezeknek az eredményképpen megállapították, hogy a CT felvételek

alkalmasak voltak – bináris képpé alakítás után -, hogy a légpórusokat szegmentálják, illetve mérjék őket. A két-paraméteres Weibull eloszlás, megfelelő modellezési eszköznek bizonyult a légpórusok esetében. Mind a skálázási faktor és a forma paramétere szignifikánsan hatással volt a légpórusok arányára az aszfaltban. A hideg, helyben újrahasznosított aszfaltburkolat esetében, összehasonlítva az aszfaltbetonnal a légpórusok főként a számosságukban különböznek, mint az átlagos méretükben. Továbbá a légpórusok eloszlása kimutathatóan különböző az egyes tömörödési módszerek esetében.

A 4 mintával dolgozó kísérlet [26] (Chen Zang et. al.) során ezeket a mintákat girator tömörítővel tömörítették 3 különböző hőfokon. A tömörítés 100 forgással történt és a próbatetek magassága a 8, 12, 16, 20, 40, 60, 80 és 100.-ik forgásnál lett feljegyezve. A CT segítségével feltérképezték a légpórusokat és becslést adtak a minták homogenitására. A vizsgálat során láthatóvá vált, hogy a hézagtartalom a minta közepén alacsonyabb volt, mint a minta szélén és a nagyobb számú tömörítés után a minták homogénebbek lettek. A CT-vel történő vizsgálatok arra is fókuszáltak, hogy milyen hatással van a tömörítés az aszfaltkeverék adalékanyag irányultságára és eloszlására. A kutatás igazolta, hogy az adalékanyag részek a próbatest széléhez közel általában rendezetten helyezkednek el, míg a próbatest közepén véletlenszerű az elhelyezkedésük. A légpórusok minden aszfaltkeverék esetében 0 és 150 mm<sup>3</sup> térfogattartományba esnek és több mint 80%-a a légpórusoknak 0 és 50 mm<sup>3</sup> térfogattartományba esett.

A képekkel való munka során a szegmentálás gyakori alapprobléma, vagyis, hogy az egyes logikailag összetartozó területeket, hogyan különíthetjük el a képen. Ez esetben egy pixel csoportot szeretnénk elkülöníteni a képen. Erre akkor lehet szükségünk, ha alakfelismerést akarunk végezni a képen, vagy ki szeretnénk ejteni a számunkra irreleváns részeket, esetlegesen szűkíteni szeretnénk a keresési tartományt (region of interest [39]). Jelen esetben a légpórusokat akarjuk szegmentálni a CT képszeleteken.

A [30] (Tao Liu et. al.) tanulmány is részletesen foglalkozik az elkészült CT felvételek javításával, hogy meg tudja határozni az aszfalt homogenitását, amire egy nagyon érdekes eljárást dolgoztak ki, amely a fraktálok segítségével próbálja becsülni ezt a tulajdonságot. Azért van szükség a CT felvételek javítására, mert az aszfaltban lévő adalékanyag sűrűsége hasonló az aszfalt kötőanyagának (asphaltmortar) sűrűségéhez. Vagyis a CT detektorában megjelenő intenzitás érték közel azonos lesz, így az előálló képszeleten nehéz megkülönböztetni a két anyagot. Ez azért jelent problémát, mert a vizsgálat tárgya az aszfalt homogenitása, itt kulcsfontosságú az egyes anyagok megkülönböztetése az aszfalt szerkezetében. Erre a gyűrűblokk módszert illetve egy javított OTSU szegmentáló algoritmust alkalmaznak, aminek eredményeképpen az előálló bináris képek minősége javulni fog. A publikáció bevezet két fogalmat, az egyik az úgynevezett kép index, amely áll a képfeldolgozás által számolt értékekből és a másik a fizikai index, amely az aszfalt fizikai tulajdonságaiból áll pl.: sűrűség, porozitás. A homogenitás vizsgálatát visszavezetik az aszfalt geometriai szerkezetének vizsgálatára. A CT képen az aszfalt komplex geometriai szerkezetű alakzat, ezért ennek a vizsgálatára a fraktál teória tulajdonságait alkalmazza. Ha az aszfalt szerkezete fraktál tulajdonságokkal bír, akkor az ez által mért geometriai tulajdonságok összefüggésben lehetnek az aszfalt fizikai indexével. Ez a tulajdonság a fraktál dimenziója,

amely számítható pl.: dobozszámláló algoritmus segítségével (box-counting method). A kísérlet célja, hogy az egyes próbatesteken mért fraktál dimenzió milyen összefüggésben van a homogenitási együtthatóval és ez által, az aszfalt fizikai indexével. A CT kép minőségének javítása eredményes volt, mert csökkent a rossz pixelek száma (bad dots). Az előállt aszfaltszerkezeti képeken számíthatóvá vált a fraktál dimenziója. Továbbá összefüggést fedeztek fel az értékek között. Nagyobb fraktál dimenzió kisebb homogenitási együtthatóval járt együtt, vagyis az aszfalt minősége is jobb ebben az esetben.

Az aszfalt vízdifúziós hatásának a vizsgálatát [31] (Xu Huining et. al.) a következőképpen határozták meg. A folyamat során két mérés történt. Az egyik a hagyományos víztöbblet tömegmérés, amihez viszonyítjuk a másik eljárást, amely a CT felvételek alapján becsüli meg a víztöbblet mértékét. A vizsgálat elején a száraz mintákról CT felvételeket készítenek és megméri a tömegét. Ezután 15 °C-os desztillált vízzel 3,5 kPa nyomáson 15 percig nedvesítik a mintákat (ez vákuumos víztartályban történik). Újra szkennelik a próbatesteket és megméri a tömegüket. Majd újra kiszáritják 40 °C-on 72 órán keresztül, hogy újra felhasználható legyen a minta. A tömegkülönbség megadja az aszfaltba bejutó víz mennyiségét. A két CT felvétel eltéréseiből pedig megpróbálják a lehető legjobban megközelíteni a mért adatokat. A CT felvételek vizsgálata szegmentációs eljárással történik. Két fő irány van: az egyikben az üregek területét méri és szegmentálja. (Ez azért történhet, mert a CT szkennelés során az intenzitásgörbék alacsony értéket vesznek fel a kis tömegű területekről készült vizsgálatkor, ilyenek pl. a légpórusok. Az előállt CT felvételeken is ezek a területek világosabbak lesznek.) A másik irány az előzőnek az ellentettje, vagyis a nem üreges területek területét szegmentálja és méri. Mivel a szegmentáció nem tökéletes, ezért ezek csak becslések lesznek. Mindkét esetben a vizsgált területek változását számszerűsíti a száraz és a vizes CT felvételek között. További paramétereket is változtat a vizsgálataiban ilyen pl. a szkennelés feszültségértéke, a szkennelés áramerősségének a mértéke illetve a távolság a röntgenforrás és a vizsgált objektum között. Ennek eredményeképpen a CT felvételek elég jól tudják közelíteni a tényleges víztömegváltozást, illetve, hogy a CT paramétereinek változtatása jelentősen befolyásolja a kapott eredményeket.

## 5. SAJÁT KÍSÉRLETEINK

Kísérleteim során összesen 16 darab mintát vizsgáltam meg CT-vel és laboratóriumi mérésekkel egyaránt (2. táblázat).

minta	új réteg típusa	réteg helye
1.	AC 22 (mNM) 25/55-65	kötő
2.	AC 22 (mNM) 25/55-65	kötő
3.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
4.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
5.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
6.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
7.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
8.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
9.	SMA 8 (mF) 25/55-65	kopó
10.	SMA 11 25/55-65	kopó
11.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
11.	AC 22 (mNM) 25/55-65	kötő
12.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
13.	SMA 8 (mF) 25/55-65	kopó
14.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
15.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó
16.	SMA 11 (mF) 25/55-65	kopó

2. táblázat: Vizsgált próbatestek

### 5.1. Laboratóriumi mérések

Laboratóriumi vizsgálataink esetén a beérkező aszfalt magmintán először meg kell határozni a réteghatárokat szemrevételezés alapján. (Már ez is problémát okozhat, hogy a réteghatárok meghúzása nem pontosan ott történik, ahol a határ van.) Ezek után egy aszfalt vágógép segítségével a mintákat a határoknál szétvágjuk. (Itt is problémát jelenthet, hogy a vágógépre nem a megfelelő pontossággal rakják le a mintákat, illetve a vágólap vastagságából kifolyólag pár mm nagyságú anyagvesztés következik be a mintánkon.) A vágás után kerül sor a hézagtartalom -, adalékanyag tartalom mérésére, és ha szükséges a bitumentartalom vizsgálatára.

Ezt a testsűrűség mérésekkel tudjuk megadni.

A testsűrűség MSZ EN 12697-6:2012 szerint [42] a próbatest szabad hézaggal együtt figyelembe vett egységnyi térfogatába foglalt tömege, ismert vizsgálati hőmérsékleten. Aszfaltbeton próbatestek esetén az SSD eljárást alkalmazzuk, ami úgy néz ki, hogy először lemérjük a próbatest száraz tömegét, aztán minimum 30 percre ismert hőmérsékletű

vízfürdőbe tesszük. Telítés után először lemérjük a víz alatti tömegét, majd a próbatest felületének megtörlése után a nedves tömegét is megmérjük.

$$\rho_{t,SSD} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w,$$

ahol:

- $m_1$  a száraz próbatest tömege,
- $m_2$  a próbatest víz alatti tömege,
- $m_3$  a próbatest nedves tömege,
- $\rho_w$  a víz sűrűsége az adott hőmérsékleten.

A hézag nélküli testsűrűség MSZ EN 12697-5:2010 szerint [43] a próbatest szabad hézag nélkül figyelembe vett egységnyi térfogatába foglalt tömege, ismert vizsgálati hőmérsékleten. A vizsgálat során a mintánkat fölmelegítjük, majd ha zúzható állapotba került a forró próbatestet kézzel vagy kanál segítségével felaprítjuk. Ezt a fellazított mintát ismert térfogatú és tömegű piknométerbe öntjük, majd a száraz mintát és a piknométert lemérjük. A piknométert felöntjük vízzel, adunk hozzá diszpergálószeret, és eltávolítjuk belőle a légzárványokat keveréssel valamint ütögetéssel. Ezek után a mintát nyomás alá helyezzük, vagyis vákuum alatt tartjuk 15 percig, majd ismert hőmérsékletű vízfürdőbe rakjuk, és addig várunk, míg a piknométerben lévő víz is felveszi a vízfürdő hőfokát. Ha ez megtörtént, feltöltjük a megadott jelig a piknométert, megtörlögetjük a külsejét és megmérjük a tömegét.

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 * V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}},$$

ahol:

- $m_1$ , az ismert  $V_p$  térfogatú üres piknométer tömege,
- $m_2$ , a száraz minta és a piknométer tömege,
- $m_3$ , a piknométer, minta és víz együttes tömege,
- $\rho_w$ , a víz sűrűsége adott hőmérsékleten.

A minta hézag tartalom vizsgálata az MSZ EN MSZ EN 12697-8 szabvány [14] szerint történik. A testsűrűség vizsgálatokat elvégezve ki tudjuk számítani a mintánk szabadhézag térfogatszázalékát, az alábbi képlet szerint:

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_{t,SSD}}{\rho_{mv}} * 100,$$

ahol:

- $\rho_{mv}$ , a minta hézag nélküli testsűrűsége,
- $\rho_{t,SSD}$ , a minta testsűrűsége.

Ezek után következik a kötőanyag tartalom meghatározása. A keverékből eltávolítjuk a bitument égetéses vagy extrahálós módszerrel. Az égetéses módszer elve, hogy magas hőfokon a mintánkból elégetjük a bitument és a hátramaradó anyag tömegéből következtethetünk a bitumen térfogatszázalékára. A hátramaradó anyag pedig értelemszerűen az adalékanyag mennyisége lesz.



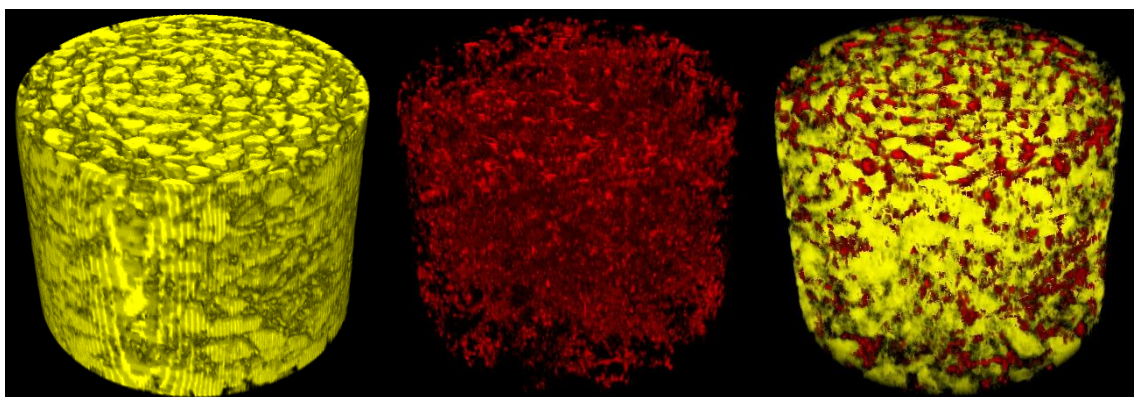
## 5.2. Aszfalt próbatestek mérése CT-vel

A kísérletek során aszfaltburkolatú útpályaszerkezetekből vett fűrt mintákat szemrevételeztünk és vizsgáltunk CT-vel. A cél az egyes aszfalt pályaszerkezeti rétegek összetételének, hibáinak és hibahelyeinek meghatározása volt.

Az eredmény, amit várunk a vizsgálatoktól, hogy a CT mérések segítségével a hagyományos laborvizsgálati eredmények kiértékelése is megbízhatóbbá válik. A CT-készülékek a vizsgált objektumokról rétegfelvételeket alakítanak ki, melyekből az anyagok belső szerkezetére következtethetünk. A felvételek elkészítéséhez röntgensugárzást használnak, melyet detektorok segítségével érzékelnek. A mérésekhez egy harmadik generációs CT berendezést (Siemens SOMATOM Sensation 16) alkalmaztunk, mely a vizsgálat tárgyát egy sík, legyezőszerű röntgensugár-nyalábbal világítja át. A felvételek kialakításakor a sugárforrás a vizsgált objektum körül forog, míg a minta átellenes oldalán a jeleit rögzítő detektorsor követi a mozgását. Így előállítható különböző irányokból a minta abszorpciós profilja, melyekből rekonstruálható a keresztmetszeti kép. A minta mozgatásával szabályos lépésközönként kialakíthatjuk a rétegfelvételeket. A modern CT berendezések egyszerre akár több szeletet is vizsgálhatnak, ezáltal gyorsítva a felvételek rögzítését. A vizsgálat a szükséges számításokkal együtt néhány perc alatt elvégezhető, viszont a teljes kiértékelés további feladatokat jelent.

Az MSZ EN 12697-6:2012 [42] testsűrűség vizsgálat és a MSZ EN 12697-5:2010 [43] hézagmentes testsűrűség vizsgálat valamint a MSZ EN 12697-8:2003 [14] hézagtartalom vizsgálat teljes kiváltása és pontosabb meghatározása válik lehetővé a CT-vel.

Továbbá, ha az aszfalt szerkezetébe belelátunk, és teljes mértékben ismerjük, akkor az aszfaltról olyan kiegészítő információt kaphatunk, melyeknek vizsgálata analitikai módszerekkel csak részben lenne lehetséges (12. ábra). A CT segítségével meghatározható lesz a rétegeken belüli adalékanyag szemeloszlás, ami laboratóriumi vizsgálatokkal nem lehet meghatározni. Mindezek mellett károsodott (repedezett, nyomvályús) szerkezetek vizsgálata is lehetővé válik, valamint a károsodás mértéke is meghatározható lesz.



a) adalékanyag

b) hézagok

c) adalékanyag és hézagok együtt

12. ábra: Aszfalt magmintáról készült 3D-s CT felvétel

Azonban megállapítható, hogy a CT mérés hátránya, hogy a 4 mm alatti szemcsék elkülönítése a bitumentartalomtól nem megoldott, ez csak nagyobb teljesítményű (jobb

felbontású) CT berendezéssel lenne lehetséges. Illetve, további nehézség az, hogy a mintadarab teteje és aljának rekonstrukciójakor a kapott szeleteken, kör-körös anomália látható, amely kizárja ezeken a részeken a pontos mérést, mivel a képen olyan defektusok keletkeznek, amelyeket szűrése még nem tökéletesen megoldott.

### 5.2.1. Réteghatár vizsgálata

A minta magyarországi aszfalt pályaszerkezetű út teherbírás növelése érdekében megerősített szakaszáról származik. A hézagtartalom jelentősen megnő a réteghatároknál, így könnyen beazonosíthatjuk azt a mintánkon. Ennek az oka, hogy a burkolat készítésekor hideg aszfalt felületre meleg réteget visznek fel, és az összedolgozás során a két réteg között egy nagy hézagtartamú rész keletkezik. A hézagtartalom a réteghatárok között sem egyenletes eloszlású, ennek oka, az aszfalt hengerléssel történő bedolgozásból származik.

A 13. ábrán jól beazonosíthatók a réteghatárok, ugyanis az egyes határokon láthatóan több a hézag, mint az adalékanyag és bitumen. CT-vel történő vizsgálat során ez be is igazolódott, melynek eredményét a 14. ábra szemlélteti.



13. ábra: Réteghatárok meghatározása

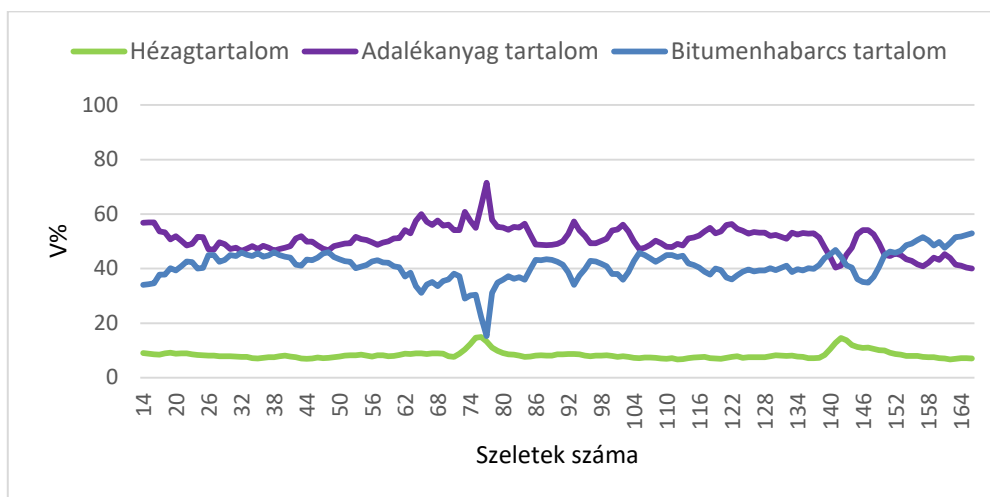


14. ábra: Hézagtartalom az egyes szeletekben

A hagyományos laborvizsgálatok során a próbatestek vágása, valamint az azt követő mérések alatt nagy a hibalehetőség, mivel az egyes réteghatárokon a próbatestek hézagtartalma megváltozik (14. ábra), így a vágás helye jelentősen befolyásolhatja a mérés pontosságát.

### 5.2.2. Adalékanyag tartalom és hézagtartalom meghatározása

A vizsgálat során a minta szeleteinek összetételét határoztuk meg, vagyis, hogy milyen arányban oszlik el az adalékanyag -, bitumentartalom valamint a hézagtartalom. A kiértékelés során látható (15. ábra), hogy a minta egyes rétegeiben közel azonos eloszlású az adalékanyag -, bitumen-, és hézagtartalom. Látható, hogy minden egyes rétegben az adalékanyag tartalom 40 - 70% közötti értékeket vesz fel, a bitumentartalom 15 – 55% között, valamint a hézagtartalom 10 – 20% között mozog. A diagram alapján jól beazonosíthatók a réteghatárok vagyis, ahol megnőtt a hézagtartalom térfogatszázaléka, ott lesz a határ. Az általam átnézett külföldi publikációk is foglalkoznak hézagtartalom méréssel is, ezek a [26; 27, 29] (Chen Zang et. al., Magdy Shaheen et. al., Lei Gao et. al.) munkák. A különböző aszfaltkeverékekben a kialakult légpórusok számának, illetve eloszlás mérésének folyamatára végeznek kutatást.



15. ábra: Adalékanyag -, hézag- és kötőanyag tartalom eloszlása egy aszfaltmintában

Ennél a vizsgálatnál viszont előjön a CT használat egyik problémája, ami szerint készített CT felvételek alapján a 4 mm alatti szemcsék elkülönítése a bitumentartalomtól nem megoldott. Ahhoz, hogy ezt meg tudjuk oldani, jobb felbontású CT berendezést kell alkalmazni.

### 5.2.3. Bedolgozási hibák kimutatása

A CT-vel készült anyagszerkezeti vizsgálatok nem csak egy értéket adnak a rétegre vonatkozóan, hanem a szeletelés méretétől függően tetszőleges részek jellemzői vizsgálhatóak. Ez, az anyagszerkezeti tulajdonságok vizsgálata, elemzése során nagy módszertani előrelépést jelenthet. Ennek következtében a CT mérési módszerrel kimutathatóak a bedolgozási hibák és egyenetlenségek, illetve az egyes rétegek közötti együttdolgozás mértékéről is lesz adatunk.

#### 5.2.4. Útpálya szerkezetek állapotának nyomon követése

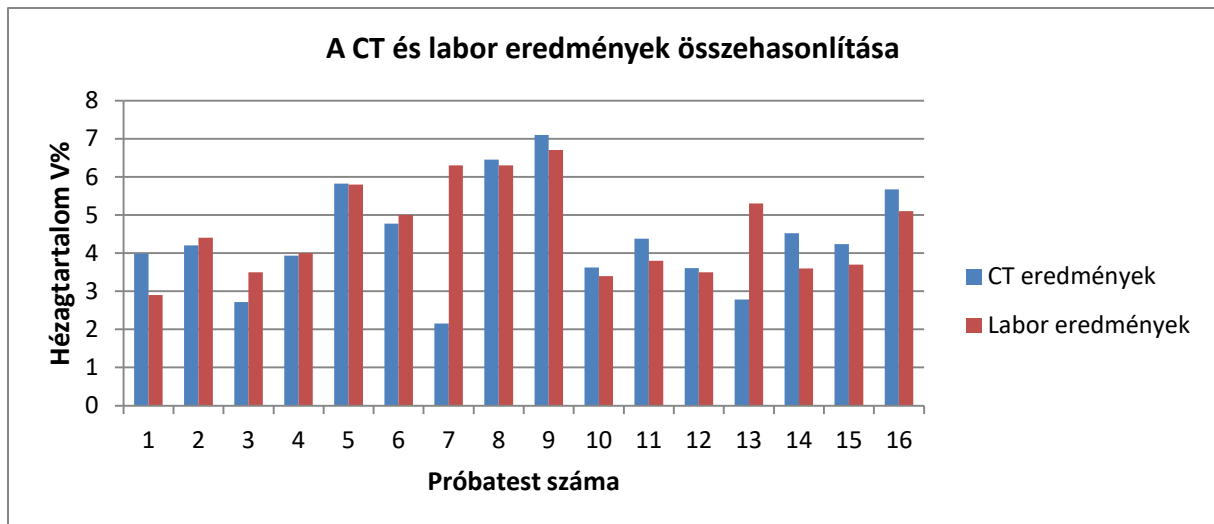
CT-vel való vizsgálatok során lehetőség nyílik a lokális aszfaltburkolati hibák kialakulásának okát feltárni. Ha a hiba helyének környezetében veszünk több mintát, a vizsgálatok eredményéből következtethetünk az okokra, például a fagyás, repedés, kőkipergés okaira. CT vizsgálatok segítségével a repedések helyét is tudjuk lokalizálni.

### 6. EREDMÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A CT és labor eredmények összehasonlítása során először a kísérletek során megkapott hézagtartalmakat vizsgáltam meg. A vizsgálat eredményeit a 3. táblázatban közlöm. A CT és laboratóriumi mérésekből a kopórétegre kapott hézagtartalmakat hasonlítottam össze, hogy lássuk, a CT eredmények mennyire követik pontosan a laboratóriumi mérések eredményeit. Ez az összehasonlítás a 16. ábrán látható.

Minta száma	CT- eredmények						labor eredmények
	kopó V%			kötő V%			V%
	hézag	adalékanyag	bitumen	hézag	adalékanyag	bitumen	hézag
1.	3,98	46,04	49,97	3,98	46,04	49,97	2,90
2.	4,20	47,28	48,52	4,20	47,28	48,52	4,40
3.	2,72	43,08	54,21	4,92	53,61	41,47	3,50
4.	3,93	47,65	48,42	4,83	57,17	37,99	4,00
5.	5,82	48,02	46,16	5,30	46,56	48,14	5,80
6.	4,77	46,13	49,10	8,44	48,43	43,13	5,00
7.	2,15	39,44	58,41	4,13	42,95	52,75	6,30
8.	6,45	51,00	42,54	3,81	43,00	53,20	6,30
9.	7,10	64,47	28,43	6,08	51,30	42,627	6,70
10.	3,62	45,58	50,80	3,62	45,58	50,80	3,40
11.	4,38	47,85	47,77	2,97	47,10	49,93	3,80
12.	3,61	35,99	60,41	6,01	40,74	53,25	3,50
13.	2,78	46,12	51,10	3,76	45,60	50,65	5,30
14.	4,52	47,44	48,03	5,86	47,84	46,30	3,60
15.	4,24	45,40	50,36	4,90	46,71	48,39	3,70
16.	5,67	50,40	43,92	5,18	47,14	47,68	5,10

3. táblázat: CT és labor eredmények



16. ábra: CT és laboratóriumi vizsgálatok hézagtartalmának összehasonlítása

A 16. ábráról leolvasható, hogy mely próbatesteknél van a legnagyobb eltérés a két vizsgálat között. Ezek az eltérések a 7. és 13. próbatestnél a legnagyobbak. A 7-es magminta esetében SMA 11 (mF) 25/55-65 kopóréteget, míg a 13-mas magminta esetében SMA 8 (mF) 25/55-65 típusú kopóréteget vizsgáltunk.

A 7. minta esetében a kopóréteg hézagtartalma 1,13% és 5,03% között változik, melynek átlaga 2,15% lett. A laboratóriumi mérések alapján a kopóréteg hézagtartalma 6,30% lett. Az eltérés több mint 4%-os, így meg kell jegyezni, hogy a kiértékelés során a CT mérés számítógépes kiértékelésében pontatlanságok jelentkeztek. Mind a hézagtartalom, és az összetétel esetében a CT-vel mért eredmények nagy eltérést mutatnak a laborvizsgálathoz tartozóan, ezért arra a következtetésre jutottunk, hogy már maga a próbatest CT-zése nem volt megfelelő.

A 13. minta esetében a kopóréteg hézagtartalma 1,53% és 5,09% között változik, melynek átlaga 2,78% lett. A laboratóriumi mérések alapján a kopóréteg hézagtartalma 5,30% lett. Ugyanehhez a szakaszhoz tartozóan az építéskor a keverőtelepen vett ömlesztett mintán laboratóriumban elvégzett vizsgálat esetén a szabadhézag-tartalom 4,0%, amely már kisebb eltérést mutat a CT-s feldolgozás eredményéhez képest.

A mérések során használt CT berendezés elsősorban orvosi felhasználásra készült berendezés, aminek jelen esetben az a hátránya, hogy a felbontása nem elég részletes. A mintákról készült felvételeknél a pixelek 0,39 \* 0,39 mm-es, de egy ipari környezetben használt CT-vel lényegesen jobb felbontás is elérhető, akár 0,1 \* 0,1 mm-es. A felbontás nem csak a kép két tengelyének irányában jelent problémát, hanem a szeletek közötti távolság is más lehet az egyes eszközök esetében. Az orvosi típusú gépek esetében a szelettávolság 1 / 1,2 mm lehet, míg az ipari gépekkel akár azonos felbontás érhető el a szeletek között is, mint a képfelbontás esetében. Vagyis a rosszabb felbontás egyrészt a szeleteken belül nem vesz észre a felbontás alatti objektumokat, illetve pontatlanság léphet fel nagyobb objektumok határainál. A szeletek közötti távolság pedig egyszerűen azt jelenti, hogy a két szelet közötti területről nem lesz információnk, ezért ezeket a részeket interpolációval, vagy egyéb eljárással kell „kitölteni”. A

kapott eredmények eltérése tehát egyrészt a készülék tulajdonságaiból adódhat, másrészt a környezeti hatásoktól.

Érdeemes lehet a felvételek elemzése szabad szemmel is, fellépnek-e ismétlődő alakzatok, szingularitások. Ha találunk a felvételeken szabályos kör/ellipszoid alakzatokat – a feltételezett anyagtól függetlenül – akkor nagy eséllyel találkozhatunk detektor hibával, ami a hardver fizikai problémáiból eredhet, vagy olyan szoftveres hibát is találhatunk, ami a rekonstrukció során kerül bele a képbe.

Továbbá a mérések során a felvétel minőségének a jellemzésére úgynevezett jel-zaj viszonzyszámot (signal-noise ratio, SNR) használtunk. A jel-zaj viszonzyszám általánosan elterjedt használata a hasznos információ és a hibás vagy nem releváns információ viszonyát adja meg, vagyis ebben az esetben a valós jel és a háttérzaj arányát írja le. Jelen esetben a SNR számítása a következőképpen alakul,

$$SNR = \frac{|I_{obj} - I_{bg}|}{\sqrt{\sigma_{obj}^2 + \sigma_{bg}^2}}$$

ahol:

$I_{obj}$  a szürkeárnyalat intenzitás értékének az átlaga egy voxelen a vizsgált objektumon

$I_{bg}$  szürkeárnyalat intenzitás értékének az átlaga egy a háttérből véve  $\sigma_{obj}$  a normális eloszlása értéke a kiválasztott régióknak az objektumra eső értékekből

$\sigma_{bg}$  a normális eloszlás értéke a kiválasztott régióknak a háttérre eső értékekből.

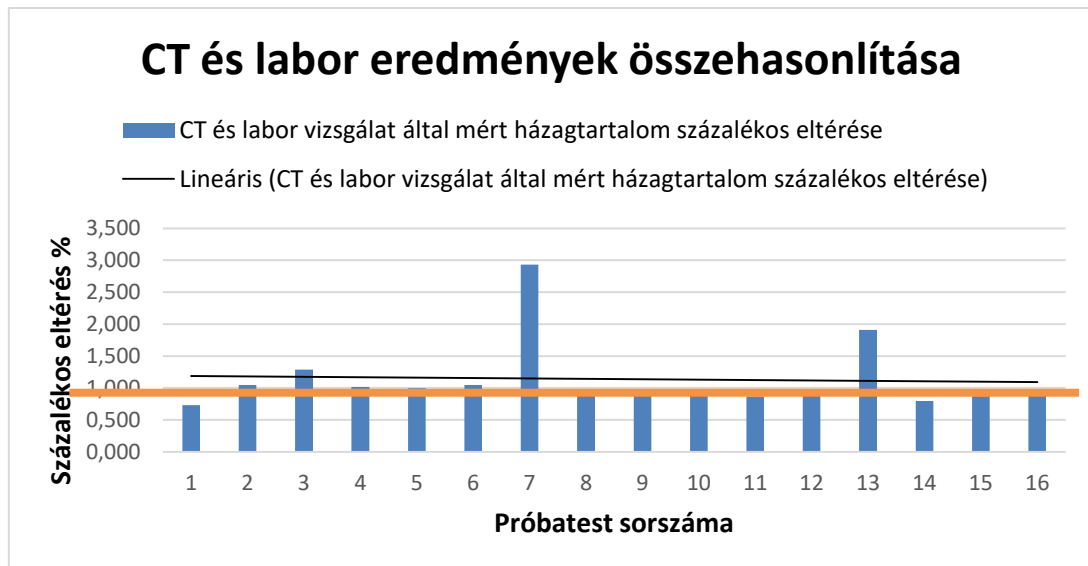
Mint tudjuk, a laboratóriumi vizsgálatok sem adnak tökéletes kiértékelést az aszfaltminta belső szerkezetéről. Hibát okozhat a számításban az aszfaltmintában előforduló légpórus, amit ugyan a hézagmentes testsűrűségnél keveréssel és diszpergálószerrel megpróbálunk 100%-osan eltávolítani, de ez nyilván lehetetlen. Másik ok lehet a zárt légpórusok jelenléte a mintában, hiszen ezekbe a víz nem tud bejutni és nem tudja feltölteni azokat.

A 4. táblázatban látható összesítve a 16 anyagmintára vett CT és labor mérések eredménye, azoknak a százalékos eltérése (a laborvizsgálathoz képest a CT eredmény). Majd ezeknek az átlaga és a szórása látható. Ezek alapján az eredmények alapján készítettem egy új grafikont (17. ábra). A grafikonon is jól látszanak a kiugró értékek, mind a 7. és a 13. próbatest esetében. Az 1% értékhez beállítottam egy jól látható vonalat (narancssárga vonal), hiszen azzal az értékkel kapjuk meg, ha azonos eredményre jut a két mérés. Bár itt újra meg kell jegyeznem, hogy a laboros mérések is a hézagtartalom esetében, bizonyos hibaszázalékkal dolgoznak, vagyis a laborban mért értékektől való eltérés elfogadható, hogyha az még pontosabban közelíti a valóságot.

Minta száma	CT hézag. V%	Laboratórium hézag. V%	Eltérés %
1.	3,98	2,90	0,729
2.	4,2	4,40	1,048
3.	2,72	3,50	1,287
4.	3,93	4,00	1,018
5.	5,82	5,80	0,997
6.	4,77	5,00	1,048
7.	2,15	6,30	2,930
8.	6,45	6,30	0,977
9.	7,10	6,70	0,944
10.	3,62	3,40	0,939
11.	4,38	3,80	0,868
12.	3,61	3,50	0,970
13.	2,78	5,30	1,906
14.	4,52	3,60	0,796
15.	4,24	3,70	0,873
16.	5,67	5,10	0,899
<b>Átlag</b>	<b>4,37</b>	<b>4,58</b>	<b>1,14</b>
<b>Szórás</b>	<b>1,35</b>	<b>1,21</b>	<b>0,55</b>

4. táblázat: CT és labor eredmények

A 17. ábra alapján mozgó átlag felvétele nem szerencsés, hiszen az  $x$  tengelyen ábrázolt adatok között nincs időbeliségi összefüggés, mégis valahogy érzékeltetni szeretném azt, hogy a 16 mérés során az átlag a kiugró eredmények ellenére megfelelő eredményt produkált. Vagyis az átlagszámításon felül szeretnék a kapott értékeimre egy olyan görbét illeszteni, ami legjobban leköveti a mérési eredményeket. Erre létezik egy módszer, amelyet lineáris regressziónak hívunk. Vagyis a lineáris regresszió becslése során a mintavételi adatok pontjaira igyekszünk egyenest illeszteni. Ezt 2 dimenzióban trendvonalaknak is hívják, és itt azzal a kikötéssel élünk továbbra is, hogy az  $x$  tengelyen nem idősort reprezentálunk. Ez az egyenes az ábrámon a fekete vonal, amely tényleg a számított átlaghoz közeli eredményt ad.



17. ábra: CT és labor vizsgálatok százalékos eltérése



## 7. ÖSSZEGZÉS

A dolgozatom során több felhasználási területét is megismertem a modern komputertomográfia által segített méréseknek. A publikációk jelenleg az alapokat próbálják lefedni ezen a területen és egyre több aspektusát tárják fel ennek a vizsgálati formának. Volt olyan publikáció, amely egy új algoritmus eredményeit mutatta be, és volt, amely általános betekintést nyújtott a CT-s vizsgálatról. Az egyetemi kutatás során jól látható mennyire jól tudja közelíteni az új mérés a régebbi laboratóriumi mérést vagy akár a szabványban meghatározott értékeket.

A CT-vel való mérések nehézségei is ismertek, és ahogy egyre nagyobb elvárást támasztunk felé, úgy kell fejlődnie a módszernek is. Ez a jövőben akár olyan CT készülékek tervezéséhez is vezethet, amely kifejezetten speciálisan erre a típusú vizsgálatra készülnek. Az elvárás ugyanis nem más, mint a régebbi mérések kiváltása, úgy, hogy jobb eredményeket tudunk kinyerni ezekből.

Szerintem a modern útpályaszerkezetek mérésének egy nagyon jó iránya ez a típusú vizsgálat. Véleményem szerint nem csak a gyorsasága és a felhasznált segédanyagok minimalizálása – melyek akár környezetkárosítók is lehetnek - a legnagyobb eredmény, hanem egy jól kidolgozott és bejáratott CT mérés során, egyszerre nagyon sok tulajdonsága válhat mérhetővé az adott mintának. A felvett nyes mintán később több típusú gépi látással kapcsolatos eljárást is futtathatunk új eredményeket kapva. Vagyis a mérések megismételhetősége és változatossága összehasonlíthatatlan ez esetben a laboratóriumi mérésekkel. Egy részletes és pontos 3D modell elmentése és archiválása után, a mintát bármikor elővehetjük és különböző aspektusból mérést végezhetünk ezeken a virtuális aszfaltmintánkon. Akár évekkel később az új – akár azonos aszfaltból – vett mintával összehasonlíthatjuk és egyben láthatóvá és számolhatóvá válnak a roncsolódással kapcsolatos értékek. A jövőbeli kutatások célja lehet tehát egyrészt kidolgozni lehetséges, új méréseket a CT felvételeken, amelyek az aszfalt egyéb fontos jellemzőit tudja számszerűsíteni, illetve a másik irány pedig ezeknek az eredmények pontosságának és az eljárás robusztusságának a növelése.

## 8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Dr. Balázs György - Építőanyagok és kémia, Műegyetemi kiadó, 2009., ISBN: 963-18-2258-3
- [2][http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/0018\\_Betontechnologiai\\_gepek\\_1/adatok.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/0018_Betontechnologiai_gepek_1/adatok.html)  
Digitális Tankönyvtár, Rácz Kornélia – Betontechnológiai gépek I., Typotex Kiadó 2012., ISBN: 978-963-279-647-5
- [3] MSZ EN 13108-1 Aszfaltkeverékek. Anyagelőírások. 1. rész: Aszfaltbeton
- [4] MSZ EN 13108-2 Aszfaltkeverékek. Anyagelőírások. 2. rész: Aszfaltbeton nagyon vékony rétegekhez
- [5] MSZ EN 13108-3 Aszfaltkeverékek. Anyagelőírások. 3. rész: Lágyaszfalt
- [6] MSZ EN 13108-4 Aszfaltkeverékek. Anyagelőírások. 4. rész: Érdesített homokaszfalt
- [7] MSZ EN 13108-5 Aszfaltkeverékek. Anyagelőírások. 5. rész: Zúzalékvázias masztixaszfalt
- [8] MSZ EN 13108-6 Aszfaltkeverékek. Anyagelőírások. 6. rész: Öntött aszfalt
- [9] MSZ EN 13108-7 Aszfaltkeverékek. Anyagelőírások. 7. rész: Porózus aszfalt
- [10] MSZ EN 13108-8 Aszfaltkeverékek. Anyagelőírások. 8. rész: Visszanyert aszfalt
- [11] [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0023\\_Utak/html/section-0152.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0023_Utak/html/section-0152.html)  
Digitális Tankönyvtár, Kisgyörgy Lajos – Utak, Typotex Kiadó 2014, ISBN: 978-963-279-753-3
- [12] <http://utugyilapok.hu/cikkek/szemcserendszerek-diszkrételes-modellezese-a-pfc-szoftverrel/>  
Útügyi Lapok, Primusz Péter – Szemcserendszerek diszkrételes modellezése a PFC szoftverrel, 4. szám, 2014. ősz, ISSN: 2064-0919
- [13] [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011\\_0060\\_epitestudomany/content/02-I-04/03.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011_0060_epitestudomany/content/02-I-04/03.html), Digitális Tankönyvtár, Macsinka Klára – Az útépités szerkezetei
- [14] MSZ EN 12697-8 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 8. rész: Aszfalt próbatestek hézagjellemzőinek meghatározása
- [15] Dr. Majorosné Lublós Éva – Építőanyagok II.
- [16] MSZ EN 12697-2 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 2. rész: A szemmegoszlás meghatározása
- [17] <http://www.betonopus.hu/notesz/fogalomtar/27-szemmegoszlás.pdf>, Betonológiai és Kőzetalkalmazástani Mérnökiroda Betéti Társaság. [Online] Betonopus Bt. [Hivatkozva: 2017. augusztus 9.]
- [18] <http://www.geolinea.hu/labor.php>, Geolinea Mérnöki Iroda Kft. [Online] [Hivatkozva: 2017. október 4.]
- [19] MSZ EN 12697-39 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 39. rész: Izzításos kötőanyag-tartalom

- [20] <https://www.inteszt.hu/termek/epitoipari-vizsgalat>, Inteszt Méréstechnika Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. [Online] [Hivatkozva: 2017. október 1.]
- [21] MSZ EN 12697-22 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 22. rész: Keréknyomképződés
- [22] <http://medicoverdiagnosztika.hu/vizsgalatok/ct/>, Medcover Diagnosztikai Központ [Online] [Hivatkozva: 2017. október 7.]
- [23] [http://radiologia.blog.hu/2009/07/26/ct\\_vizsgalat\\_nativ\\_kontra\\_kontrasztos](http://radiologia.blog.hu/2009/07/26/ct_vizsgalat_nativ_kontra_kontrasztos), Radiológia [Online] [Hivatkozva: 2017. október 7.]
- [24] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Komputertomogr%C3%A1fia>, Wikipédia [Online] [Hivatkozva: 2017. szeptember 5.]
- [25] [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0019\\_1A\\_Orvosi\\_Lekepezestechnika/ch12s03.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0019_1A_Orvosi_Lekepezestechnika/ch12s03.html) Digitális tankonyvtár, Balkay László – Orvosi leképezéstechnika, 2011.
- [26] Chen Zhang, Hainian Wang Ph.D., Zhanping You Ph.D., Xu Yang Ph.D. - Compaction characteristics of asphalt mixture with different gradation type through Superpave Gyrotory Compaction and X-Ray CT Scanning, Construction and Building Materials, 2016. október 31., ISSN: 0950-0618
- [27] Magdy Shaheen, Adil Al-Mayah, Susan Tighe - A novel method for evaluating hot mix asphalt fatigue damage: X-ray computed tomography, Construction and Building Materials, 2016. március 16., ISSN: 0950-0618
- [28] Hainian Wang, Ran Zhang, Yu Chen, Zhanping You, Jun Fang - Study on microstructure of rubberized recycled hot mix asphalt based X-ray CT technology, Construction and Building Materials, 2016. június 3., ISSN: 0950-0618
- [29] Lei Gao, Fujian Ni, Hailong Luo, Stephane Charmot - Characterization of air voids in cold in-place recycling mixtures using X-ray computed tomography, Construction and Building Materials, 2015. március 28., ISSN: 0950-0618
- [30] Tao Liu, Xiao-ning Zhang, Zhi Li, Zhou-quan Chen - Research on the homogeneity of asphalt pavement quality using X-ray computed tomography (CT) and fractal theory, Construction and Building Materials, 2014. július 26., ISSN: 0950-0618
- [31] Xu Huining, Tan Yiqiu, Yao Xingao - X-ray computed tomography in hydraulics of asphalt mixtures: Procedure, accuracy, and application, Construction and Building Materials, 2016. január 27., ISSN: 0950-0618
- [32] Hainian Wang, Chen Zhang, Lian Yang, Zhanping You - Study on the rubber-modified asphalt mixtures' cracking propagation using the extended finite element method, Construction and Building Materials, 2013. október, ISSN: 0950-0618
- [33] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Weibull-eloszl%C3%A1s>, Wikipédia [Online] [Hivatkozva: 2017. október 4.]
- [34] <http://www.mediacy.com/imageproplus>, Media Cybernetics [Online] [2017. október 4.]

- [35] [https://en.wikipedia.org/wiki/Thresholding\\_\(image\\_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Thresholding_(image_processing)), Wikipédia [Online] [Hivatkozva: 2017. október 4.]
- [36] [https://en.wikipedia.org/wiki/Image\\_histogram](https://en.wikipedia.org/wiki/Image_histogram), Wikipédia [Online] [Hivatkozva: 2017. okt. 4.]
- [37] [https://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_depth](https://en.wikipedia.org/wiki/Color_depth), Wikipédia [Online] [Hivatkozva: 2017. október 4.]
- [38] [https://en.wikipedia.org/wiki/Otsu%27s\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Otsu%27s_method), Wikipédia [Online] [Hivatkozva: 2017. okt. 4.]
- [39] [https://en.wikipedia.org/wiki/Region\\_of\\_interest](https://en.wikipedia.org/wiki/Region_of_interest), Wikipédia [Online] [Hivatkozva: 2017. okt. 4.]
- [40] <https://www.codeproject.com/Articles/31014/Image-Processing-Basics-in-C>, Code Project [Online] [Hivatkozva: 2017. október 4.]
- [41] <https://digital-photography-school.com/how-to-read-and-use-histograms/>, Digital Photography School [Online] [Hivatkozva: 2017. október 4.]
- [42] MSZ EN 12697-6:2012 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 6. rész: Aszfalt próbatestek testsűrűségének meghatározása
- [43] MSZ EN 12697-5:2010 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 5. rész: A hézagmentes testsűrűség meghatározása