



KÜLÖNBÖZŐ TÍPUSÚ LÉGSZŪRŐK NYOMÁSVESZTESÉGÉNEK ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA

Bagossy – Molnár Péter
/XNBUQT/

Szakdolgozat
/BMEGEÁTA4SD/

Benyújtva az
Áramlástan Tanszéken
2013 decemberében

a

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnök alapszak/Gépészeti fejlesztő szakirány
képzésben

Bachelor of Science (BSc)
fokozat megszerzésére

Témavezető:
Dr. Suda Jenő Miklós, adjunktus

Áramlástan Tanszék
Gépészmérnöki Kar
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

NYILATKOZAT

Név: Bagossy – Molnár Péter
 Neptun kód: XNBUQT
 Egyetem: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
 Kar: Gépészmérnöki Kar
 Tanszék: Áramlástan Tanszék
 Alapszak / Szakirány: Gépészmérnöki alapszak (BSc képzés)
 Gépészeti fejlesztő szakirány
 Szakdolgozat címe: Különböző típusú légszűrők nyomásveszteségeinek összehasonlító vizsgálata
 Beadás éve: 2013 / 2014 - I.

Alulírott, Bagossy – Molnár Péter (XNBUQT), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy a bírálatra és a védésre benyújtott jelen Szakdolgozat kizárólag saját munkám eredménye, a témavezető útmutatásai alapján meg nem engedett segítség nélkül magam készítettem.

A Szakdolgozatban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem, és a szerzői jogi szabályoknak megfelelően kezeltem (a szükséges lábjegyzet / végjegyzet hivatkozásokat, valamint az ábrák hivatkozását megfelelően helyeztem el).

Egyúttal elfogadom, hogy a Szakdolgozatban szereplő tudományos eredményeket a témavezető Tanszéke felhasználhatja további kutatási vagy oktatási célokra.

Budapest, 2013. december 13.

(aláírás)

TÁJÉKOZTATÓ

A mind nyomtatott, mind elektronikus formátumban benyújtott Szakdolgozat, valamint annak hivatalos bírálata a védést követően a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszék könyvtárában (H-1111 Budapest, Bertalan L. 4-6. BME „Ae” épület) érhető el.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szakdolgozatom kidolgozásában Dr. Suda Jenő Miklós segédkezett, akinek ezúton is szeretnék köszönetet mondani. Továbbá szeretném kiemelni Kórik Zoltán diplomamunkáját, amelyben elkészítette a légszűrőrendszer CAD modelljét, melyet a szakdolgozatom során én is felhasználtam. Ezen felül hálával tartozom még az Áramlástan Tanszéknek is, aki a tanszéki labort a rendelkezésemre bocsájtotta.

KIVONAT

Szakedolgozatom témája egy személygépkocsi légszűrőrendszerének részét képező, különböző gyártmányú légszűrők nyomásveszteségének összehasonlító vizsgálata. Az irodalomkutatás során tanulmányoztam a légszűrő rendszerek, illetve a légszűrő kialakítását és működési elvét. A vizsgált rendszerrel kompatibilis, többféle gyártó által forgalmazott eltérő kialakítású légszűrő. A célom az volt, hogy megvizsgáljam milyen hatással vannak ezek a különbségek az egyes szűrők szűrési tulajdonágaira. Az egyes légszűrők összehasonlíthatóságának egyik szempontja a szűrőfelületen áthaladó levegő nyomásesése. A tanszéki laboratóriumban egy meglévő mérőállomás segítségével kimértem az egyes légszűrők nyomásveszteség-térfogatáram, nyomásveszteség-sebesség és a szűrőfelületre ható erő-térfogatáram karakterisztikáit. Mindezek alapján az egyes gyártmányok kereskedelmi árát is figyelembe véve összehasonlítottam a különböző gyártók légszűrőit. A véges térfogatú szimulációk peremfeltételeihez szükséges mennyiségeit a mérés során mért értékekből határoztam meg.

Kiegészítettem és egyes részleteket újradefiniáltam a légszűrőrendszer egy korábban készített CAD modelljében, illetve létrehoztam különböző gyártmányú légszűrők részletes, parametrikus modelljét a Pro Engineer szoftver segítségével, illetve megalkottam a légszűrőrendszer és a szűrő térfogati modelljét. A létrejött modellt az Ansys Workbench-be importáltam, behálóztam és hálófüggetlenségi vizsgálatot végeztem. Az áramlási szimulációk futtatását követően kiértékeltem az így kapott eredményeket.

ABSTRACT

The theme of my thesis is the analysis of different types of air filter's pressure drop, which form part of the air filter system of a car. During some literature investigation, I studied about the air filter systems and the construction and working of air filters. Several filters (marketed by many manufacturers) are compatible with the examined system. My purpose was to investigate the influences of these differences on the air filter's properties. One of the possibilities to compare different filters, is the pressure drop of the air on the filter's surface. In the department's laboratory, different types of air filter's pressure drop–volume flow rate, the pressure drop–velocity and the act of force on the filter–mass flow rate characteristics were measured. Using this, and taking into account the filter's prices, the different type of air filters are compared. The necessary quantities from the measured data were evaluated for the simulation's boundary conditions.

Zoltán Kórik's CAD model was supplemented and redefined in some details, in addition different types of detailed filters and parametric models in Pro Engineer were created, and the volume parts of the system were also generated. The created models were imported into Ansys Workbench, where they were meshed and mesh independence study was also made. Following the CFD simulations, the results were evaluated.

TARTALOMJEGYZÉK

NYILATKOZAT	iii
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	iii
KIVONAT / ABSTRACT	iv
TARTALOMJEGYZÉK	v
JELÖLÉSJEGYZÉK	vi
1 A LÉGSZŰRŐ	1
1.1 A szakdolgozat célja	1
1.2 A légszűrőrendszer	1
1.3 A légszűrő kialakítása és általános jellemzői	2
2 A MÉRÉS	6
2.1 A mérés célja	6
2.2 A légszűrő rendszer kialakítása	6
2.3 A mérés során használt eszközök	9
2.4 A mérés menete	11
3 A MÉRÉS KIÉRTÉKELÉSE	13
3.1 Kiértékelése	13
3.2 A légszűrő karakterisztikák meghatározása és összehasonlítása	17
3.2.1 A légszűrők nyomásesés-térfogatáram karakterisztikájának meghatározása	18
3.2.2 A légszűrők nyomásesés-sebesség karakterisztikájának meghatározása	19
3.2.3 A légszűrők felületi erő-térfogatáram karakterisztikájának meghatározása	20
3.2.4 A légszűrők áranak és szűrési tulajdonságainak összehasonlítása	22
3.2.5 Összegzés	23
3.3 Hibaszámítás	24
4 A LÉGSZŰRŐRENDSZER CAD MODELLJE	25
4.1 Előzmények	25
4.2 Az alkatrészek geometriája	25
4.3 Az egyes alkatrészek térfogatainak megalkotása	30
5 A LÉGSZŰRŐRENDSZER VÉGES TÉRFOGATÚ MODELLJE	32
5.1 További mennyiségek meghatározása az áramlástan szimulációkhoz	32
5.1.1 Az egyes légszűrőkre vonatkozó permeabilitások meghatározása	33
5.2 A véges térfogatú modell kialakítása FLUENT-ben	35
5.3 A véges térfogatú modell hálójának létrehozása	36
5.3.1 Az egyes térfogati elemek hálózása	38
5.3.2 Hálófüggetlenségi vizsgálatok	39
5.4 A numerikus szimuláció és peremfeltételei	41
5.5 Futtatás és kiértékelés	45
ÖSSZEFOGLALÁS	50
IRODALOMJEGYZÉK	51
MELLÉKLETEK	52

JELÖLÉSJEGYZÉK

<i>a</i>	hosszúság méret [m]
<i>A</i>	felület [m^2]
<i>b</i>	szélesség méret [m]
<i>C</i>	átfolyás tényező [-]
<i>c</i>	köpenyvastagság méret [m]
<i>C₂</i>	tehetetlenségi ellenállás tényező [m^{-1}]
<i>d</i>	mérőperem utáni nyílás átmérője [m]
<i>D</i>	mérőperem előtti csőátmérő [m]
<i>F</i>	szűrő felületére ható erő [N]
<i>h</i>	magasság méret [m]
<i>k</i>	turbulens kinetikus energia [$m^2 \cdot s^{-2}$]
<i>\dot{m}</i>	tömegáram [$kg \cdot s^{-1}$]
<i>n</i>	darabszám [-]
<i>p₀</i>	légnomás [Pa]
<i>p</i>	nyomás [Pa]
<i>P</i>	teljesítmény [W]
<i>q_v</i>	térfogatáram [$m^3 \cdot s^{-1}$]
<i>R</i>	egyetemes gázállandó [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
<i>t</i>	hőmérséklet [$^{\circ}C$]
<i>T</i>	hőmérséklet [K]
<i>v</i>	sebesség [$m \cdot s^{-1}$]
<i>V</i>	térfogat [m^3]

GÖRÖG BETŰS JELÖLÉSEK

α	permeabilitás [m^2]
β	átmérő arány [-]
Δm	szűrőréteg vastagság [m]
Δp	nyomásesés [Pa]
ε	expanziós szám [-]
κ	adiabatikus kitevő [-]
μ	dinamikai viszkozitás [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]
μ_0	1 bar nyomású levegő dinamikai viszkozitás [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]
ρ	sűrűség [$kg \cdot m^{-3}$]

ALSÓ / FELSŐ INDEXEK

<i>D</i>	mérőperem előtti
<i>f</i>	szűrő (filter)
<i>g</i>	gáz
<i>fgb</i>	félgömb
<i>gumi</i>	a szűrő lamelláit összefogó gumiköpeny
<i>i</i>	i-ik változó
<i>ki</i>	kiáramló
<i>lam</i>	lamella
<i>lev</i>	levegő
<i>lek</i>	lekerekítés
<i>m</i>	motor
<i>mért</i>	mérés során meghatározott
<i>n</i>	<i>n</i> -ik változó
<i>nyer</i>	nyerhető
<i>szál</i>	szűrőszál (egyedi szál)
<i>s</i>	telítési (saturation)

DIMENZIÓNKÜLI MENNYISÉGEK

<i>Re</i>	REYNOLDS-szám
-----------	---------------

RÖVIDÍTÉSEK

<i>BCS</i>	beömlő csőcsonk
<i>FV</i>	fűvő
<i>LHA</i>	légszűrőház alsó fele
<i>LHF</i>	légszűrőház felső fele
<i>LSZ</i>	légszűrő
<i>LSZA</i>	légszűrő térfogati elem alsó fele
<i>LSZF</i>	légszűrő térfogati elem felső fele
<i>LTM</i>	légtömegmérő egység
<i>TE</i>	terelőelem
<i>FVM</i>	véges térfogati módszer
<i>MP</i>	mérőperem

1. A légszűrő

1.1 A szakdolgozat célja

A szakdolgozatom alap gondolatát az a kérdés adta, hogy egy BMW 318is típusú személygépkocsi légszűrőrendszeréhez megvásárolható gyári illetve utángyártott légszűrők között milyen különbségek lehetnek. A BMW gyári katalógusa [1], gyári (Air filter element: 13721715881) légszűrőként két gyártó termékét ajánlja; Bosch, illetve Mahle Knecht márkájú légszűrőket. Azonban körbenézve akár egy alkatrészszaküzletben, akár az interneten ehhez a típusú személygépkocsihoz nagyon sok további gyártó termékét is megtaláljuk. Elméletileg ezek mind kompatibilisek a már említett rendszerrel, azonban koránt sem egyformák. Mind főbb paramétereiket, mind pedig árukat tekintve számos különbség figyelhető meg. Különösen igaz ez az úgynevezett „sport-légszűrőkre”, mint amilyen pl. a K&N márkájú.

Megfogalmazódik tehát a kérdés, hogy az egyes kialakítások közti különbségek milyen hatással vannak az egyes típusok szűrési tulajdonságaira, mint pl. a nyomásesés, vagy a leválasztási képesség.

A kísérleti és numerikus szimulációs (CFD) vizsgálatok célja a szűrők nyomásesésének összehasonlító neve volt.



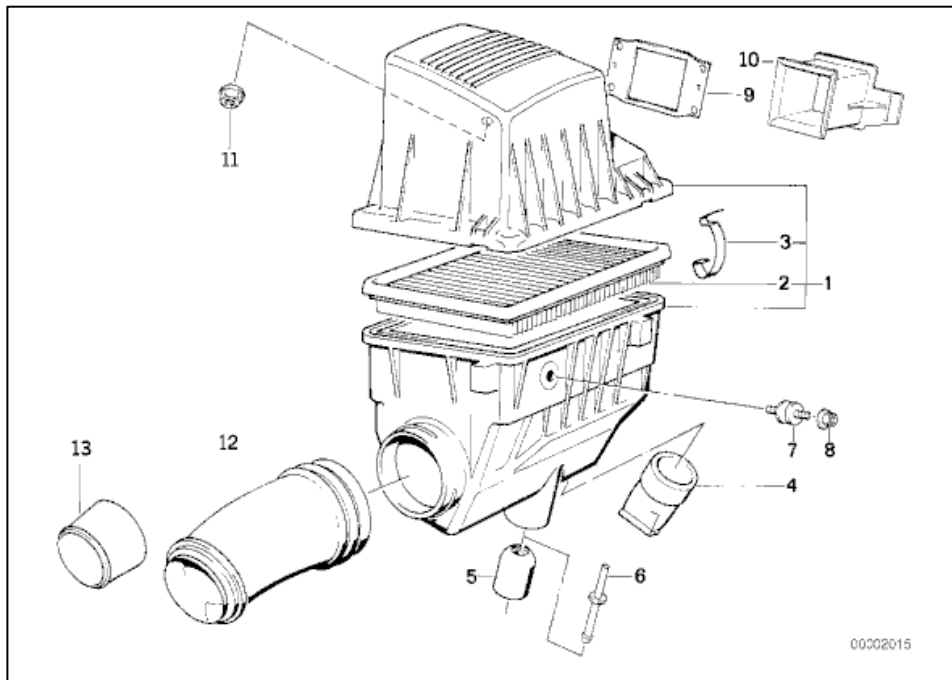
1.1 ábra: Az autó [15] és a motortérbe beépülő légszűrőrendszer

A későbbiekben vázolt szemcseleválasztó képesség (illetve hatásfokának) kimérésére a szakdolgozatom során nem volt lehetőség. Az említett hatás bemutatásával pusztán a szűrést, illetve annak folyamatát volt céлом vázolni.

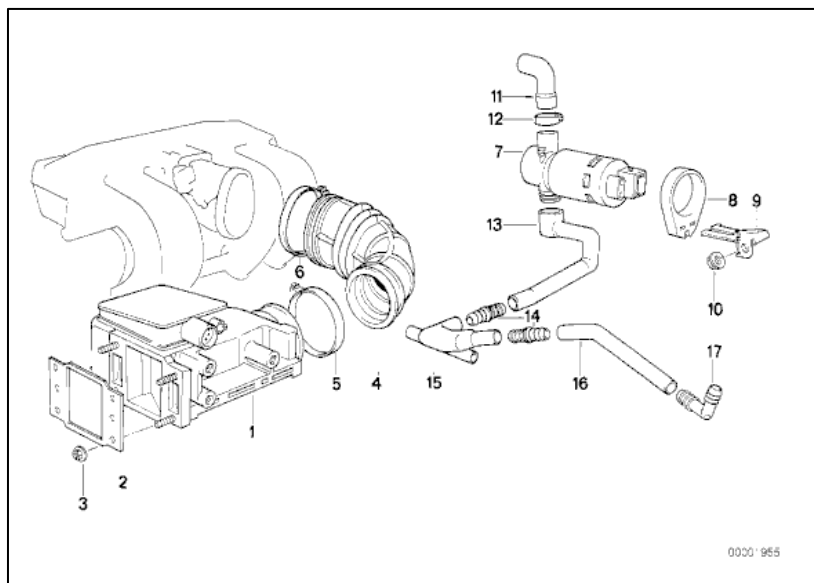
1.2 A légszűrőrendszer

Az **1.2 ábrán** a (12) jelű csőcsonton keresztül (a gépjármű első lámpái mögött) áramlik a levegő a légszűrőrendszerbe. Ezt követően keresztül halad a légszűrőn (2), majd egy terelő elem (10) keresztül elhagyva a házat, a torlólapos légtömegmérő egységen (1) a szívócsomkokon keresztül a hengerekbe jut. A továbbiakban részletezett mérési összeállítás ezt a légszűrőrendszert hivatott modellezni [2].

A légszűrőrendszer pontos kialakítását az **1.2** és **1.3 ábrák** szemléltetik.



1.2 ábra: A légszűrőrendszer főbb részei [1]



1.3 ábra: A légtömegmérő egység és a szívócsonk [1]

1.3 A légszűrő kialakítása és általános jellemzői

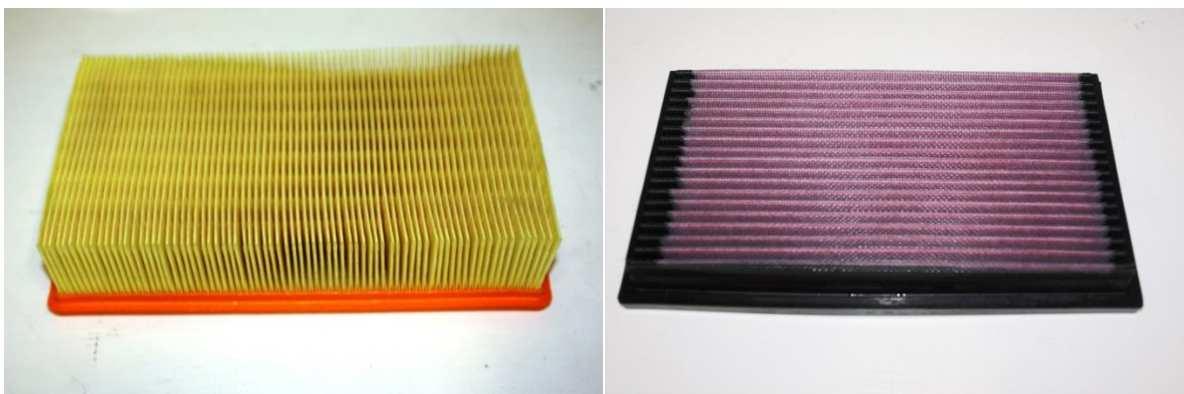
Az említett gépjárműtípusba a sokféle kialakítású légszűrő közül egy viszonylag egyszerű alaksajátosságú, úgynevezett „Panel Filter” kialakítású építhető be. A motor által a környezetből beszívott levegő mindig tartalmaz olyan kisméretű szennyezőanyagokat, szemcséket, melyek koncentrációja az időjárási és környezeti viszonyok függvényében változnak. A légszűrő biztosítja, hogy a motortérbe minél tisztább levegő juthasson. A szűrési folyamat során a portartalmú levegőt szűrőszálak összességéből álló porózus szűrőrétegen vezetjük keresztül, mely során a porszemcsék

különböző leválasztási mechanizmusok eredményeképpen visszamaradnak [5]. A szűrőréteget szövetek, rostos anyagok alkotják. A szűrőközeg kialakítási formája szerint tömlős, táskás, szemcseágyas, rostágyas valamint gyertyaszűrőkről beszélhetünk. A személygépkocsiknál használt szűrők rendszerint ún. táskás kialakításúak. Ez azt jelenti, hogy a légszűrő egyes lamelláinak végei a szűrési oldalon össze vannak ragasztva (az egyes lamellák így táskákat, zsákokat alkotnak). Ennek az a szerepe, hogy a levegő ne áramolhasson a lamellák mellett, amivel kikerülhetné a szűrési felületet. Az egyes szűrőlamellákat egy gumiköpeny fogja össze, melynek a nyilvánvaló merevítés mellett az is a szerepe, hogy az alsó és felső légszűrőházrészek peremei között ellássa a tömítést. Szövetrétegű szűrőknél, a szűrőanyagok általában szövetek vagy filcek lehetnek. Anyagukat tekintve készülhetnek gyapotból, gyapjúból, lenből, kenderből valamint mesterséges műszálakból (poliamid, poliészter, PVC stb.) is.



1.4 ábra: K&N gyártmányú légszűrő lamelláit alkotó elemi szálakból szőtt anyag nagyított képe [3]

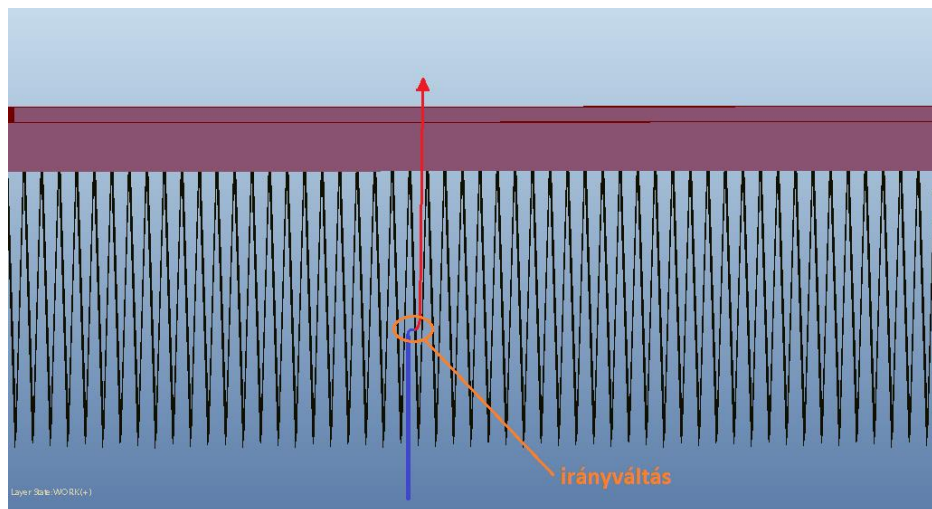
A személygépkocsikban használt légszűrők kialakítása, a legtöbb esetben nagyon hasonló a lamellák kialakításnak szempontjából. Általánosságban elmondható, hogy légszűrők lamellái a légszűrő hosszanti oldalára merőlegesen helyezkednek el. Azonban az úgynevezett sportlégszűrők között előfordul (pl.: a vizsgált K&N márkájúnál), hogy ezek a lamellák a hosszanti oldallal párhuzamosan állnak. Az egyes kialakítások közti különbséget az **1.5 ábra** hivatott szemléltetni.



1.5 ábra: Hagyományos kivitelű (balra: Bosch) és sport (jobbra: K&N) légszűrő kialakítása

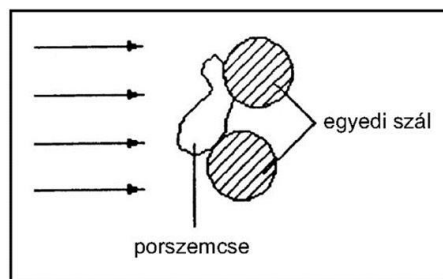
Az egyes szűrőfelületek meredek szögben, élre hajtva helyezkednek el egymáshoz képest. Ennek több oka is van; a lehető legnagyobb szűrőfelület biztosítása minél kisebb helyen, illetve a már említett szűrőtáskás kialakítás biztosítása. Mindezek mellett a szűrőn átáramló levegő a lamellák a vízszintessel bezárt meredek (közel 90°-os) szögei miatt, egy

viszonylag kis térfogaton, nagymértékű irányváltásra kényszerül. Ennek következtében az irányváltozás hatására a levegőben lévő porszemcsék, nagyobb tehetetlenségük miatt igyekeznek megtartani eredeti irányukat, és a lamelláknak ütközve kiválnak a gázáramból [4],[5].



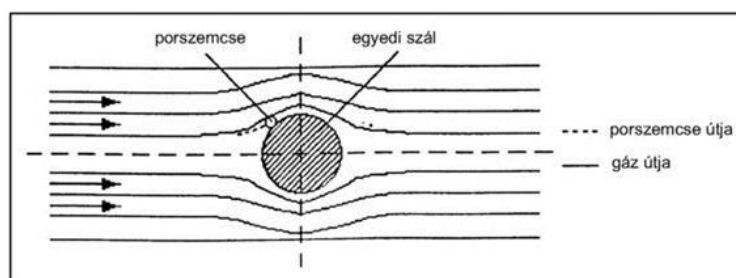
1.6 ábra: A légszűrőn átáramló levegő irányváltása (CAD modell)

A fentiekben már említett hatáson kívül a lamellákon más típusú szűrőhatások is érvényesülnek. Ezek közül az egyik legnyilvánvalóbb a szűrőfelületek porózusságából (lyukacsos, hálószerű kialakításából) adódó hatás, mely során minden olyan porszemcse visszatartódik, amelynek mérete nagyobb, mint a szövetben jelenlévő pórus (**1.7 ábra**).

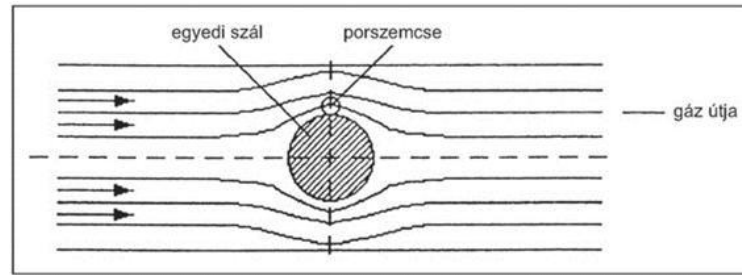


1.7 ábra: A porszemcse leválasztódása a szűrőfelületen

A befűvott levegőben lévő porszemcsék különböző méretűek lehetnek. Így az olyan szemcsék, amelyek átmérője kisebb, mint az egyes szálak közti távolságok, átjuthatnak a szűrőfelületeken. Azonban a szűrés során egyéb hatások is létrejönnek, amelyek a porszemcsék leválasztásában további szerepet játszanak. Ilyen hatás a tehetetlenségi felütközés (**1.8 ábra**). A porszemcsék tehetetlenségük következtében az áramlási vonalakat elhagyják, és ha valamilyen akadállyal (jelen esetben a szűrőszállal) érintkezésbe kerülnek, felütköznek, majd azon feltapadva leválasztódnak a gázáramból.



1.8 ábra: A porszemcse tehetetlenségi ütközése



1.9 ábra: A porszemcse befogása

További hatásként beszélhetünk a befogásról (1.9 ábra), amely révén akkor ütközik fel egy porszemcse az elemi szárra, ha a porszemcse ún. határ-áramvonalon halad, amelynek elemi szál felületétől mért legkisebb távolsága kisebb, vagy egyenlő a porszemcse sugarával. Ez esetben a szemcse akkor is felütközik a szárra, ha nem mozdul el a gázhoz képest. Ezen kívül légszűrők esetén még sokféle hatás játszik szerepet a porleválasztásban, azonban ebben az esetben ezeknek nincs jelentőségük. Az elemi szárra felütköző szemcsék a *van der Waals* (töltéssel nem rendelkező részecskék között kialakuló gyenge másodrendű kémia kötés) erő és az olajfilmmel bevont szűrőszálak (pl.: K&N márkájú) esetén a felületi feszültségből származó erő hatására tapadnak fel az egyes szálakra, vagy a már korábban leválasztott szemcsékre [4].

A légszűrők felületén üzemidejük alatt jelentős mértékben felhalmozódnak a levegőből kiválasztódó porszemcsék és szennyeződések. Kezdetben az így felhalmozódott porréteg maga is szűrőréteggént szolgál a továbbiakban beáramló porral szemben. A porlerakódások ahhoz vezetnek, hogy megnő a légszűrő nyomásvesztése, ennek következtében pedig csökken a motor hasznos teljesítménye. Ipari körülmények között ilyenkor különböző módszerekkel visszatisztítják a szűrőt, azonban egy gépkocsi légszűrőjét ebben az esetben csupán lecserélik.

Az általam vizsgált légszűrők közül az eddig említettektől kismértékben eltérő kialakítású, és merőben eltérő felhasználhatóságú a K&N gyártmányú. Ezen légszűrő szűrőfelületét, egy többrétegű (kb 4-6 rétegű) „gyapot-géz”-ből megformált, ritka szövésű fémhálós merevítéssel ellátott lamella sor adja [3]. Ez a lamella sor azonban az eddigieknél jóval ritkább kialakítású, vagyis kevesebb lamella pár alkotja a szűrőfelületet. Ezen kívül, ezen gyártmányú légszűrő felülete egy speciális olaj filmréteggel is be van fújva. Ennek az a célja, hogy a szűrő felületének pórusai között átáramló maradék porszemcsét is megkösse. A folyamat során a porrészemcske és a folyadékfilm találkozásakor a porrészemcske behatol folyadékfilmbe és megkötődik annak felületén. Így még nagyobb hatásfokú porleválasztás érhető el, mint száraz szűrőfelülettel.

Ezt a légszűrőt a többivel szemben teljesen meg lehet tisztítani (mosással). A tisztítás során azonban a már említett olaj filmréteg is eltávolításra kerül, így azt az eljárás végén újra fel kell vinni a felületre. Elméletileg így visszaállítható a légszűrő újszerű állapotára jellemző nyomásvesztés és leválasztási hatásfok is, illetve ezt a szűrőt így jóval ritkábban kell majd újabbra cserélni. Ez a gyakorlatban annyit jelentene, hogy mivel a gyártó a szűrő élettartamát 1 000 000 mérföld (vagyis kb 1 609 300 futott km) megtételére garantálja, ezért egy átlagos felhasználó szempontjából ez egyet jelent azzal, hogy sosem kell majd a légszűrőt lecserélni [3].

2 A mérés

2.1 A mérés célja

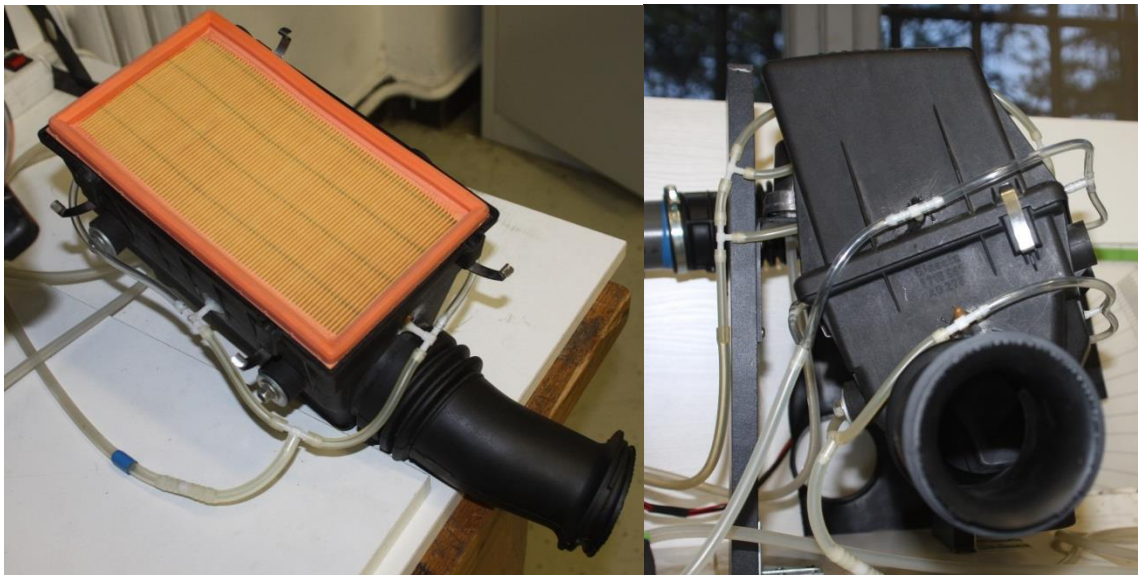
Az egyes légszűrő gyártmányok nyomásveszteség–térfogatáram jelleggörbéinek kimérését az Áramlástan Tanszék laboratóriumában végeztem. A mérőállás kialakításában nagy segítséget jelentett, hogy az említett személygépjárműben található légszűrő rendszerrel teljes mértékben megegyező kialakítású kísérleti mérőrendszer állt rendelkezésemre.

Az általam elvégzett mérés célja a különböző légszűrők nyomásvesztésének összehasonlítása volt. A levegő térfogatáramából, illetve ebből adódóan a sebességéből az egyes légszűrő karakterisztikák összehasonlításán kívül, a későbbi numerikus áramlástan (CFD) szimulációk bemenő peremfeltételeit, illetve áramlástanai állandóit is meg tudtam határozni.

2.2 A légszűrő rendszer kialakítása

A légszűrő rendszer kialakítását az **2.1** és **2.2 ábra** hivatott szemléltetni.

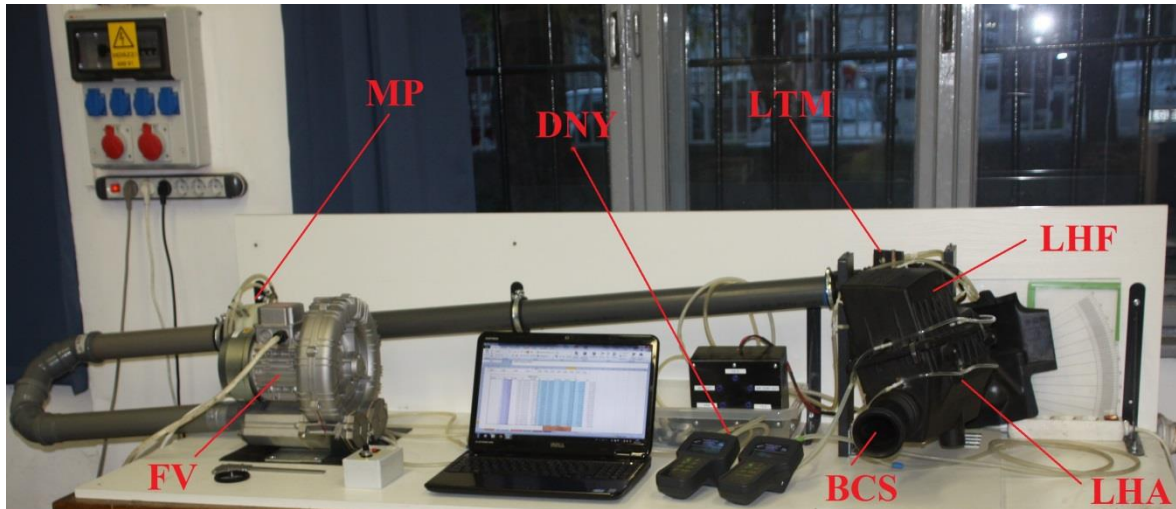
A rendszer áll egy bemeneti cső idomból, amelyen keresztül a levegő a légszűrő rendszerbe beáramlik, légszűrőházból (ami alsó és felső részből), amelyeket fémkapcsok tartanak össze. A légszűrő a ház alsó és felső része közé van befogva a már említett fémkapcsok, illetve az erre a célra kialakított, az egyes házrészek peremeinek segítségével. A légszűrő ház felső részének kivezetésénél található egy terelőelem, amely a jobb áramlási feltételeket hivatott biztosítani.



2.1 ábra: A légszűrőház kialakítása és a légszűrő illeszkedése

A légszűrő ház kivezetésénél található a légtömegmérő egység, amely a beszívott levegő mennyiségét méri, és a motorvezérlés számára adatot szolgáltat annak érdekében, hogy a $\lambda = 1$ légfelesleg tényezőre való üzemanyag befecskendezés biztosított legyen. Ezen elemen belül helyezkedik el egy torlólap, amelynek ellentartását egy rugó biztosítja. A torlólap állásszöge függ az átáramló levegő mennyiségétől. Mivel a rendszerbe alkalmazott fűvő (FV) teljesítménye korlátozott, így a szelep állásszögét (manuálisan) a legnagyobb állítottam be, ezzel is biztosítva a maximális légtömeg áramot. A légtömegmérő utáni mérőszakasz egy csökönnyököt, illetve egy hosszú egyenes szakaszt követően tartalmaz egy

mérőperemet. A szabályos átfolyó mérőperem lehetővé teszi az átáramló közeg térfogatáramának meghatározását, a rajta mért nyomásesésből kiindulva [6]. A mérőperemet további csőszakasz és egy csőkönyök köti össze egy fúvó szívóoldalával. A fúvó fordulatszáma egy frekvenciaváltóval szabályozható.



2.2 ábra: A légszűrő rendszer kialakítása, illetve annak részei

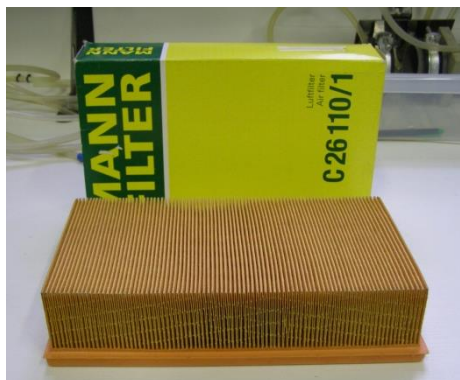
BCS: beömlő csőcsenk
 LHA: légszűrőház alsó fele
 LHF: légszűrőház felső fele
 LTM: légtömegmérő egység
 DNY: digitális nyomásmérők
 MP: mérőperem
 FV: fúvó

A különböző gyártmányú légszűrők nyomásesési jelleggörbéinek meghatározása céljából, a mérés során összesen 7 db különböző gyártójú és kialakítású légszűrőt használtam. Az említett gyártmányoknak a lemerített paramétereit, a gyártók megnevezését, cikkszámát, illetve jellemző méreteivel együtt az **2.1 táblázatban** foglaltam össze. A táblázatban *a*, *b* és *h* méretek a szűrőlamellákat befoglaló téglatest fő oldalméretei, illetve ebben a téglatestben n_{lam} lamellapár helyezkedik el.

2.1 táblázat: Az egyes légszűrő gyártmányok

			<i>hosszúság</i>	<i>szélesség</i>	<i>magasság</i>	<i>lamella pár</i>
	<i>Név</i>	<i>Cikkszám</i>	a [mm]	b [mm]	h [mm]	n_{lam} [db]
1	Mann Filter	C26110/1	245	137	48	86
2	Bosch	1457429964	243	137	47	75
3	Mahle Knecht	LX105	240	137	47	75
4	Racer	R3152	243	138	48	88
5	Tecneco	AR334PM	240	137	48	92
6	Unix	P161 H13-02-2564	240	137	46	74
7	K&N	33-2059	118	232	19,4	19

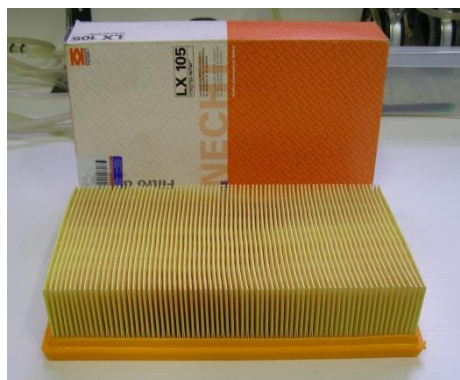
A különböző gyártmányú, megnevezésű légszűrők kialakítását a lenti képek szemléltetik.



2.2 ábra: Mann Filter légszűrő



2.3 ábra: Bosch légszűrő



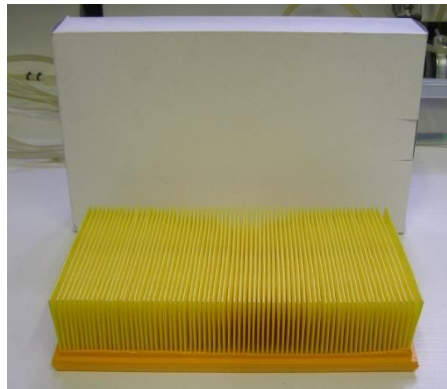
2.4 ábra: Mahle Knecht légszűrő



2.5 ábra: Racer légszűrő



2.6 ábra: Tecneco légszűrő



2.7 ábra: Unix légszűrő



2.8 ábra: K&N sport légszűrő

Jól láthatóan az egyes gyártmányok fő méretei közel azonosak, hiszen ugyanannak a légszűrőrendszernek a gyári szűrőjét helyettesítő típusai. A hosszúság, szélesség és magasság méretek természetesen nem a légszűrő lamelláit összefogó gumiköppennyel együtt értendők, hanem azok csupán a lamella sor méretei. Ugyanakkor megfigyelhető az is, hogy az egyes gyártmányok lamella párojainak száma nem egyezik meg. Ebből következik, hogy a továbbiakban részletezett számítások során sem egyezik majd meg az egyes gyártmányok szűrőfelülete.

A vizsgálat során választ kapunk arra a kérdésre, hogy mi az oka annak, hogy különböző n_{lam} számú légszűrőket vásárolhatunk.

2.3 A mérés során használt eszközök

A laboratóriumi mérés során használt műszereket, mérőeszközöket és azok jellemzőit, az **2.2 táblázatban** részleteztem.

2.2 táblázat: A mérés során használt mérőműszerek

Megnevezés	típus	szám/típus	tartomány	felbontás	hiba
Hőmérő	Greisinger	GMH 3530	"-100"-"+250" °C	0,1°C	±0,2 °C
Digitális barométer	Setra	Model 470	0,6-1,1 mbar	0,01 mbar	±0,02%
Mérőszalag	Sola-Metal	UK982504	0-3 m	0,01 m	-
Tolómérő	Mitutoyo	S/N 10050639	0-155 mm	0,02 mm	±0,01 mm
Digitális nyomásmérő	Honeywell-SurSense	EMB-100(7)	±1250 Pa (Δp)	0,01 Pa	±2 Pa
Digitális nyomásmérő	Honeywell-SurSense	EMB-100(10)	±1250 Pa (Δp)	0,01 Pa	±2 Pa

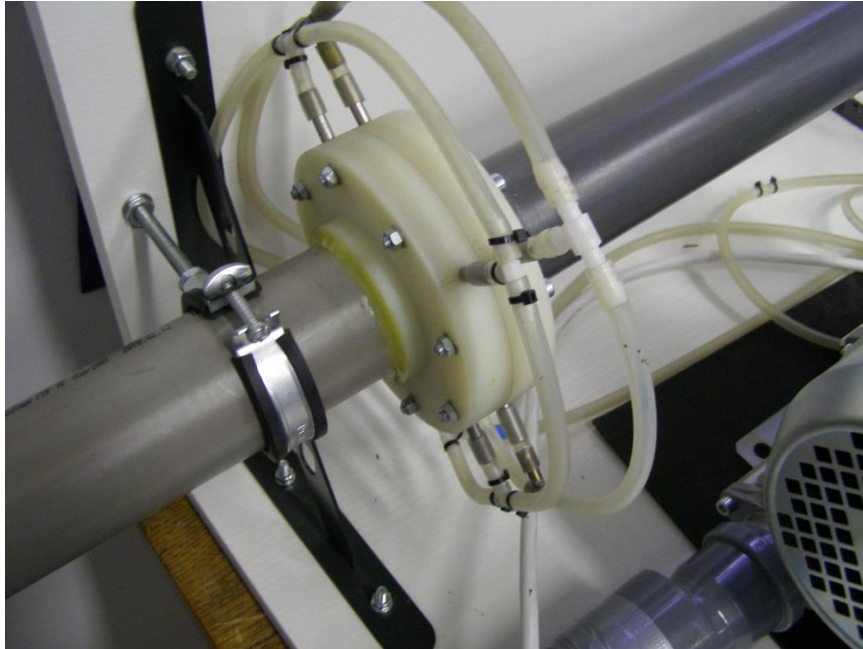
A nyomást mind a légszűrő előtt illetve után, mind pedig a mérőszakaszon található mérőperem nyomásmegcsapolásain kell mérni. Ezt a négy helyen mért statikus nyomásértékeket kétcsatornás digitális nyomásmérők segítségével tudtam kimérni.

A szűrő előtt, illetve után is a légszűrőház alsó és felső felénél 4-4 megcsapolási pontban – az egyes feleknél a pontok kivezetését összekötve – körvezetéken mérhető a statikus nyomások átlaga.



2.9 ábra: A légszűrőház egyes megcsapolási pontjai a statikus nyomás méréséhez

Továbbá mérnünk kell a mérőperemnél fellépő nyomásesést, illetve a mérőperem előtti abszolút nyomást. Ebből a későbbiekben a légnyomás ismeretében már számíthatóak a keresett mennyiségek, aminek a menetét a továbbiakban fogom ismertetni. Mindezen értékek mérését digitális nyomásmérő segítségével végeztem el, amelynek 2 csatornás kialakítása lehetővé tette a mérés leegyszerűsítését, így egyszerre vizsgálhattam a mérőperem nyomásesését, illetve az az előtti abszolút nyomást.



2.10 ábra: A levegő tömegáramának méréshez átfolyó mérőperem

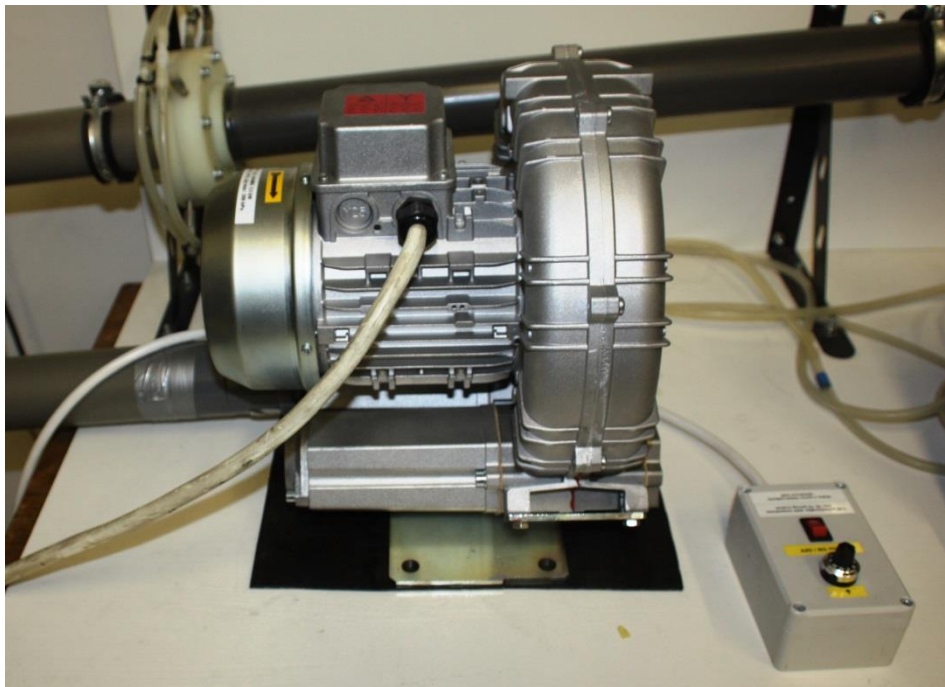
Továbbá rögzítettem a mérés során érvényes légnyomást, illetve hőmérsékletet a laborban. Ebben segítségemre volt az Áramlástan Tanszék laborjában felszerelt és automatizált digitális barométer, illetve hőmérő, amelyek folyamatosan mérték a légnyomást, illetve levegő hőmérsékletét. Az említett mennyiségeket, a műszerek meghatározott egyenlő időközönként fel is jegyezték. Ez az időtartam mindkét műszer esetén 5-5 perc [9], [10]. Ezeket az értékeket aztán a tanszéki honlapról letölthettem egy szöveges dokumentum formájában. Az így mért értékeknek átlagát vettem csak figyelembe, az általam a laborban eltöltött időpontokra nézve. A gyártmányú légszűrőknél így külön-külön is meghatározhattam az egyes légnyomás és hőmérséklet értéket, ami a számítások pontosságát segítette elő.

2.4 A mérés menete

A légszűrőrendszer levegő ellátását a valóságban a motor szívóereje biztosítja. A mérés során ezt a hatást egy fűvóval hoztuk létre. A fűvó fordulatszámát egy frekvenciaváltóval lehetett szabályozni. A mérőperemen mért nyomásesésből a későbbiekben majd a rendszer térfogatáramát szeretném meghatározni, ami viszont az 1.1 összefüggés értelmében $q_v \sim \sqrt{\Delta p}$ viszonyban áll a nyomással [6].

$$q_v = C \cdot \varepsilon \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p_{MP}}{\rho}} \quad (1.1)$$

Annak érdekében, hogy a mért teljes térfogatáram tartományban egyenletesen elosztott mérési pontokat vegyek fel, meg kellett határozni egy olyan skálát, amelynek segítségével egyenlő mértékben 20 mérési pontra felosztva, már kb. meghatározhatóak azok a nyomásesési értékek ahol a mérést el kell végezni. Egy próbamérés során határoztam meg a frekvenciaváltó skálájának ezen értékeit, amelyeknek elrendeződését az **1.3 táblázat** szemlélteti. Ez tehát azért fontos, hogy az egyes légszűrő karakterisztikák kimérésekor ezen értékekre állítva a frekvenciaváltót, olyan nyomásnagyságokat tudok mérni, amiből közel egyenletes eloszlású térfogatáramokat tudok számítani. Ez az eloszlás persze csak hozzávetőleges, mivel a frekvenciaváltó skálájának felbontásából adódóan nem lehetett pontos értékeket beállítani, ezért azzal az egyszerűsítéssel éltem, hogy a kapott értékeket kerekítve adtam meg.



2.11 ábra: A levegő beszívásáért felelős fűvó és az azt szabályozó potméter

1.3 táblázat: Mérőpontok a frekvenciaváltó skáláján

sorszám	Δp_{MP}	$\sqrt{\Delta p_{MP}}$	frekvencia skála	
			pontosan	kerekítve
1	11200,4	105,8	990	990
2	10116,7	100,6	918	920
3	9088,1	95,3	871	870
4	8114,7	90,1	827	830
5	7196,4	84,8	777	780
6	6333,2	79,6	732	730
7	5525,2	74,3	684	680
8	4772,3	69,1	634	630
9	4074,5	63,8	587	590
10	3431,8	58,6	535	535
11	2844,3	53,3	484	485
12	2311,9	48,1	434	435
13	1834,6	42,8	384	385
14	1412,4	37,6	334	335
15	1045,3	32,3	283	280
16	733,4	27,1	235	235
17	476,6	21,8	188	190
18	275,0	16,6	142	140
19	128,4	11,3	102	100
20	37,0	6,1	61	60

A továbbiakban (a fenti módszer segítségével) tehát már meg tudtam mérni az egyes légszűrőkön, illetve a mérőperemen keletkező nyomáseséseket, kellően egyenletes felosztású 20-20 mérési pontban, illetve közel azonos térfogatáramok mellett.

A mért értékeket táblázatos formába foglaltam és azokat Excel-be rendeztem. Az egyes légszűrőkhöz tartozó adatsorok a Mellékletben, az egyes légszűrők gyártója szerint rendezve megtalálhatóak.

3 A mérés kiértékelése és további számítások

3.1 Kiértékelés

Ahhoz hogy a különböző gyártmányú légszűrőket összehasonlíthassam, a mérés elvégzése után a mért nyomáskülönbségekből további számításokat végeztem. A mérőperemen mért nyomáskülönbségből az 1.1 összefüggés alapján elméletileg már meghatározható a mérőperemen átáramló levegő sebessége. Ehhez a további paraméterek ismerete szükséges, amelyeket az **3.1 táblázatban** foglaltam össze.

3.1 táblázat: A mérőperemes térfogatáram mérő fontosabb paraméterei

d	0,04	[m]
D	0,0594	[m]
κ	1,4	[-]
T_0	273,16	[K]
T_s	122	[K]
μ_0	1,71E-05	[Pas]
R	287	[J/kgK]

A térfogatáram meghatározásához szükség van a mérőperem átmérőviszonyára:

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{0,04 \text{ [m]}}{0,0594 \text{ [m]}} = 0,6734 \text{ [-]} \quad (1.2)$$

Emellett szükséges még az expanziós szám, illetve az átfolyási szám meghatározása. Ezen értékek viszont minden egyes mérési pontban eltérőek, mivel azok függenek a mérőperemen mért nyomás értékektől is.

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta p_{MP}}{\kappa \cdot p_1} \quad (1.3)$$

Ahonnan a p_1 abszolút nyomás a mérőperem előtt a digitális nyomásmérő kettes csatornáján mért túlnyomás és a laborban a tanszéki digitális barométer által mért légnyomás összegéből adódott ki. ($p_1 = \Delta p_1 + p_0$)

Az átfolyási szám kiszámítása az 1.4 es összefüggés alapján történik.

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} + 0,011(0,75 - \beta) \left(2,8 - \frac{D}{0,0254} \right) \quad (1.4)$$

Azonban a fenti összefüggésben ismeretlen még a mérőperem előtti csőátmérővel számolt Reynolds-szám, illetve az A konstans, ami szintén a Reynolds-szám függvénye.

$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D} \right)^{0,8} \quad (1.5)$$

$$Re_D = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (1.6)$$

Jól láthatóan a Reynolds-szám a sebesség függvénye, ami viszont az átfolyási tényező függvénye, ami ugyanakkor a Reynolds-szám függvénye, így tehát a keresett értékek kiszámításához iterációt kellett, hogy alkalmazzak. Ehhez első lépésben az 1.7 átalakítást alkalmazva, illetve az így kapott egyenlet jobb oldalát egy A_1 mennyiségnek véve, egyszerűbb alakra hozva felírható az átfolyási szám és a Reynolds-szám közti összefüggés.

$$\frac{Re_D}{C} = \varepsilon \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{d^2}{\mu \cdot D} \sqrt{2\Delta p_{MP} \cdot \rho} \quad (1.7)$$

$$Re_D = A_1 \cdot C \quad (1.8)$$

Az iterációt a következő lépések szerint végeztem el:

1. lépés:

$$C_\infty \rightarrow A_1 C_\infty = Re'_D \quad (1.9)$$

$$Re'_D \rightarrow 0,5961 + 0,0261\beta^2 - \dots + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6\beta}{Re'_D} \right)^{0,7} + \dots = C' \quad (1.10)$$

2. lépés:

$$C' \rightarrow A_1 C' = Re'_D \quad (1.11)$$

$$Re'_D \rightarrow 0,5961 + 0,0261\beta^2 - \dots + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6\beta}{Re''_D} \right)^{0,7} + \dots = C'' \dots stb. \quad (1.12)$$

Az első iterációs ciklusban az átfolyási számot $C_\infty = 0,6$ feltételezve, az iteráció során az eredmények viszonylag gyorsan (már 3 lépés után) konvergálnak. Ez akkor mondható el, ha az átfolyási tényező két iterációs lépés közti eltérése nem haladja meg a 0,5%-ot [6].

A további szükséges mennyiségeket, mint a levegő sűrűsége, illetve dinamikai viszkozitása az alábbi összefüggésekből, minden egyes mért légszűrő esetén az ahhoz a méréshez tartozó időintervallumban mért átlaghőmérsékletből tudtam meghatározni.

$$\rho = \frac{p_0}{R \cdot T} \quad (1.13)$$

$$(1.14)$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \frac{T_0 + T_s}{T + T_s} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2}$$

A fenti számítások segítségével így már kiszámíthatóvá vált a levegő térfogatárama, illetve ebből az 1.15 összefüggés alapján rendszer egyes pontjain, mint pl. a légszűrő felületén az átáramló levegő sebessége. A légszűrő felületére kiszámítani az egyes térfogatáramokhoz tartozó áramlási sebességek nagyságát (v_f) azért célszerű, mert a továbbiakban többek között ez alapján lehet majd az egyes gyártmányok összehasonlítását elvégezni.

$$v_f = \frac{q_v}{A_i} \quad (1.15)$$

Az 1.15 kifejezés értelmében ahhoz, hogy meghatározhassam a légszűrőn keresztülamló levegő sebességét, ki kellett számoljam az adott légszűrők össz-szűrőfelületét, amelyet az 1.16 összefüggés szerint végeztem el. A felület nagy részét (a K&N szűrőt leszámítva) egyszerű geometriai formák összessége, nevezetesen téglalapok alkotják (ld. **3.1 ábra** szűrőtáskák). Az egyes gyártmányok szűrőfelületének nagyságát az **3.2 táblázat** tartalmazza.

$$A_f = b \cdot h \cdot 2 \cdot n_{lam} \quad (1.16)$$

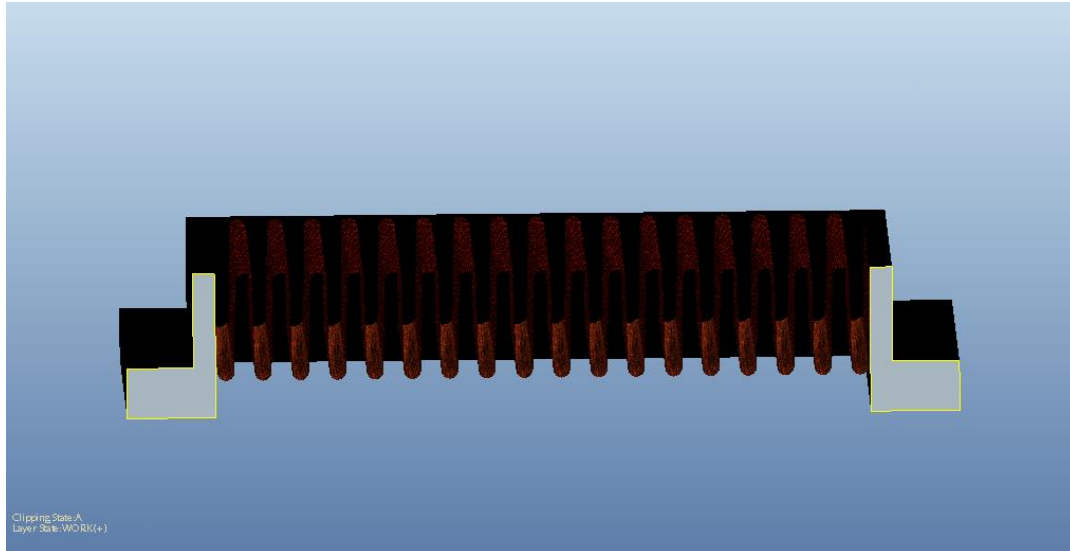
3.2 táblázat: Az egyes légszűrők szűrőfelületei

Név	Össz-szűrőfelület	
	[mm ²]	[m ²]
Mann Filter	1131072	1,1311
Bosch	965850	0,9659
Mahle Knecht	965850	0,9659
Racer	1165824	1,1658
Tecneco	1209984	1,2100
Unix	932696	0,9327
K&N	211482	0,2115



3.1 ábra: Szerkezeteti eltérés a Bosch (és az össze többi), illetve a K&N gyártmányú légszűrő között

A K&N gyártmányú légszűrő szűrőfelületének kiszámítását, annak geometriai kialakításából adódóan nem a fenti módon számítottam. Az egyes lamellák felületének egy részét itt is téglalapok alkotják, azonban azok irányváltását összekötő, lekerekítő rész már jelentős pluszfelülettel bír a többi élre hajtott szűrőtáskás légszűrőhöz képest. Így ez a rész nem tekinthető elhanyagolhatónak.



3.2 ábra: K&N gyártmányú légszűrő metszeti képe (CAD)

A 3.2 ábrán jól látszik, hogy a lekerekítés és a hozzá csatlakozó lamellák metszeti képe jó közelítéssel egy félkörnek tekinthető a K&N szűrő esetén. Tehát az egyes lekerekítések felülete egy hengerpalást felületéhez hasonlóan határozható meg. Az összes lekerekítés felülete így az alábbi összefüggés szerint számítható.

$$A_{lek} = \frac{(2 \cdot r_{lek} \cdot \pi \cdot b)}{2} \cdot n_{lek} = 0,0405 [m^2] \quad (1.17)$$

Ahol az 1.17 képletben szereplő $r_{lek} = 2,5 [mm]$ a lekerekítések sugara, illetve az $n_{lek} = 37 db$ a légszűrőlamellákat összekötő lekerekítések száma.

A K&N légszűrő teljes szűrőfelületet pedig úgy kaptam, hogy a fenti összefüggés eredményeként adódott rész felülethez hozzáadtam az egyes lamellák összességéként adódó felületet.

$$A_f = A_{lek} + (b \cdot h \cdot 2 \cdot n_{lam}) = 0,2115 [m^2] \quad (1.18)$$

Ezek alapján már meghatározhatóvá váltak a légszűrők felületein átáramló levegő sebességei is.

A kiértékelés során számított minden mennyiség, a mért nyomásértékekkel együtt táblázatos formában megtalálhatóak a Mellékletek között (M.2.1-M.2.7)

3.2 A légszűrő karakterisztikák meghatározása és összehasonlítása

A légszűrő karakterisztikák összehasonlítását többféleképpen is elvégeztem. Először ábrázoltam gyártójuk szerint az egyes légszűrők nyomásesését a rajta átáramló v_f szűrési sebességének függvényében ($\Delta p = f(v_f)$). Továbbá a nyomásesés és sebesség hányadosát szintén a levegő sebességének a függvényében ($\frac{\Delta p}{v_f} = f(v_f)$). Az egyes gyártmányokra nézve ezeket külön-külön diagramokon ábrázoltam, melyek a mellékletek között megtalálhatóak (**M3.1 - M3.7**). Ezen karakterisztikák ábrázolásával elsősorban annak eldöntése volt a célom, hogy az egyes légszűrőkön lamináris, vagy turbulens-e a kialakuló áramlás, amely a CFD szimulációhoz szükséges paraméterek szempontjából fontos.

A Reynolds-szám értéke alapján eldönthető az áramlás lamináris vagy turbulens jellege, és ez a dimenziótlan mennyiség a többi jellemző állandó nagyságából adódóan csak a v_f sebességtől függ [7].

$$Re_f = \frac{v_f l_f \rho}{\mu} \quad (1.19)$$

A vizsgálat további célja tehát ennek a határsebességnek a megkeresése volt, amelynél kisebb v_h esetén lamináris, és amelynél nagyobb v_h esetén turbulens az áramlás. A Reynolds-szám értéke ezen a határon kb. $Re \approx 2300$, a [7].

A légszűrő szűrőfelülete porózus rétegnek tekinthető felület. Ez alapján igaz rá az alábbi összefüggés, mely a porózus rétegen áthaladó közeg nyomásesése, illetve a közeg áramlási sebessége között teremt kapcsolatot [12].

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_f + C_2 \frac{1}{2} \rho v_f^2 \right) \Delta m \quad (1.20)$$

Az 1.20 összefüggésben Δm a porózus réteg vastagsága, α a viszkózus ellenállása, illetve C_2 a tehetetlenségi ellenállás tényező. Ez az összefüggés egy másodfokú görbét ír le a porózus rétegen átáramló közeg nyomásesése és sebessége között. Amennyiben az áramlás lamináris, úgy a C_2 konstans nulla.

Jól látható módon azonban az ábrázolt diagramok egyikén se figyelhető meg egy határozott határsebesség, amiről elmondható lenne, hogy onnantól válik az áramlás turbulenssé. Jó közelítéssel mindegyik légszűrő nyomásesés-sebesség karakterisztikája lineárisnak mondható. Emellett az egyes mérési pontokban a szűrőfelületre a Reynolds-számot az 1.19 összefüggés szerint tudtam meghatározni.

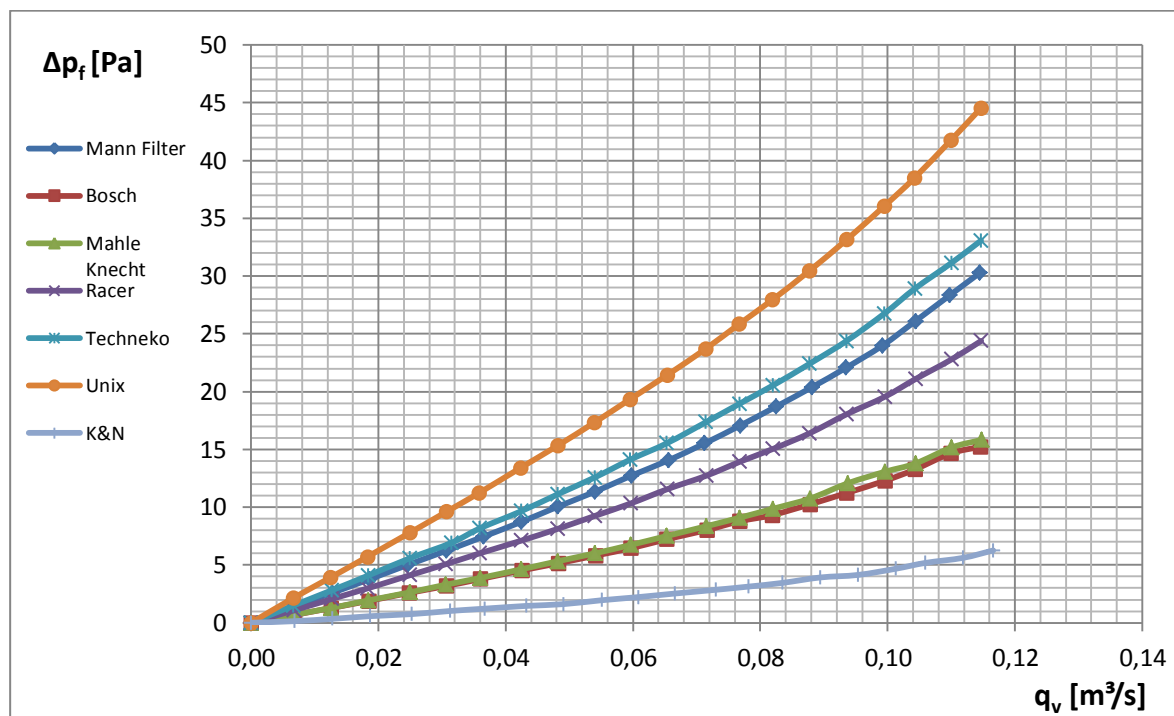
Azonban az összefüggésben szereplő l_f jellemző méret, itt nem az adott csőkeresztmetszet átmérője, hanem a szűrőn való átáramlás úgynevezett jellemző mérete. Jelen esetben ez a légszűrő lamellájának a vastagsága $\Delta m = l_f$, aminek az értékét $l_f = 2 \cdot 10^{-4} [m]$ -nek vettem fel.

Mint ahogy a térfogatáram meghatározása során, itt is minden egyes mérési pontban meg kell határozni a Reynolds-számot. Az így kiszámított Reynolds-számok értéke táblázatos formában, a Mellékletekben megtalálható (**M.2.1.- M.2.7.**).

Összességében elmondható, hogy minden egyes pontban a vizsgált dimenziótlan jellemző nem éri el az $Re = 2300$ -as értéket, tehát a különböző gyártmányú légszűrőkön átáramló levegő lamináris áramképű. Ennek megvizsgálása fontos a későbbi CFD szimulációk peremfeltételeinek a megadásában. Ezen kívül meg lehetett volna még vizsgálni a szűrőfelületét alkotó egyedülálló szálak átmérőjével, mint jellemző mérettel definiált Reynolds számát is. Ekkor a jellemző méret megközelítőleg $d_{szál} = 20 - 30 [\mu m]$ nagyságú. Azonban még ezen esetekben sem éri el a vizsgált Reynolds-szám a lamináris-turbulens határértéket.

3.2.1 A légszűrők nyomásesés-térfogatáram karakterisztikájának meghatározása

A továbbiakban egy diagramon ábrázoltam a különböző gyártmányú légszűrők nyomásesését a térfogatáram függvényében.



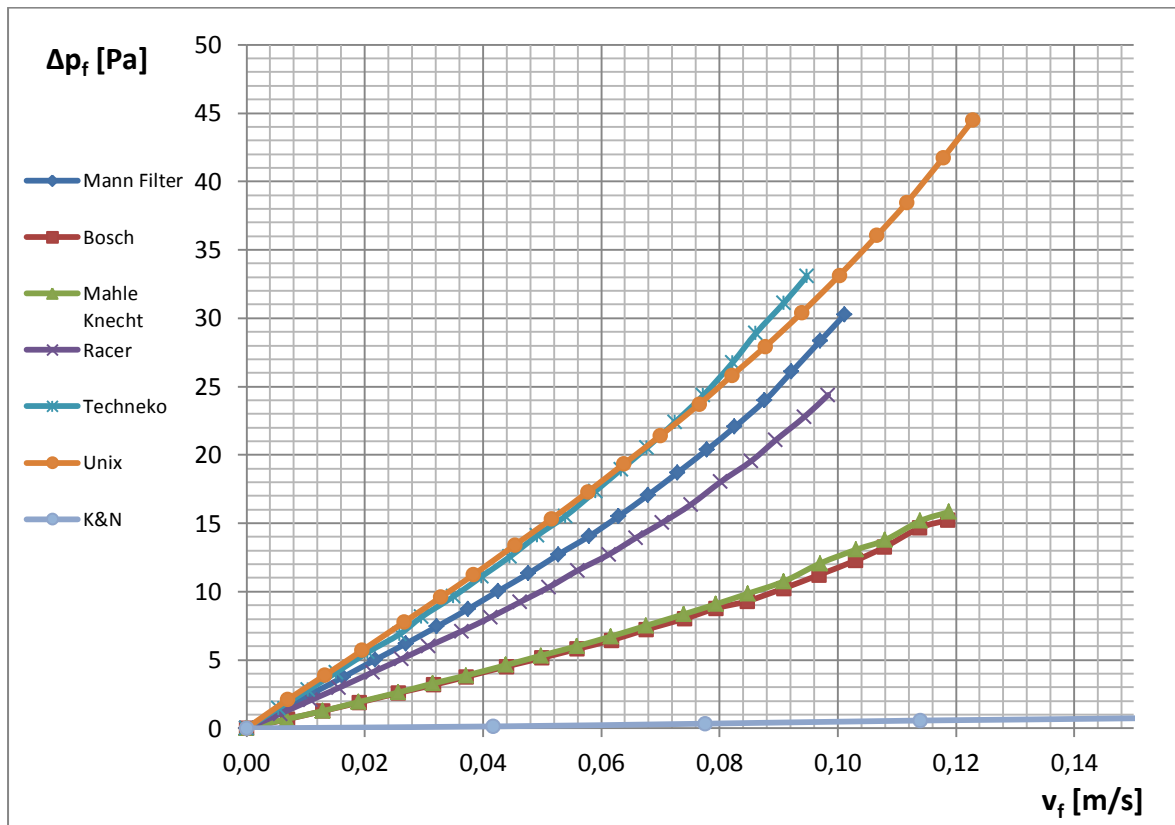
3.3 ábra: A különböző gyártmányú légszűrők nyomásesése a térfogatáram függvényében

Jól láthatóan azonos térfogatáram mellett K&N gyártmányú légszűrő nyomásesése a legkisebb mértékű, ami egyrésztől várható is volt, mivel ez a gyártó kifejezetten sportlégszűrőként árulja ezt a terméket. A „sportosság” a légszűrők nyomásvesztés karakterisztikáját illetően azt jelenti, hogy tiszta levegő áramlása esetén minimalizálják a légszűrő miatti veszteségteljesítményt, így a motor teljesítményének nagyobb része „fordítható” hasznos célokra (pl.: gyorsulás, végsebesség). Azonban természetesen nem jelenthető ki ezek alapján, hogy ez volna a legjobb, mert más szempontból viszont – pl.: részecskeleválasztás szempontjából – lehet, hogy rosszabbul teljesítene, mint a nálánál nagyobb nyomásesésű légszűrők. A BMW gyári leírása a Bosch és Mahle Knecht gyártmányú légszűrőket ajánlja. Nem meglepő tehát, hogy ezen légszűrőknek szintén viszonylag alacsony a nyomásesése, sőt ami a térfogatáram–nyomásesés karakterisztikájukat illeti, csaknem azonosnak mondhatóak.

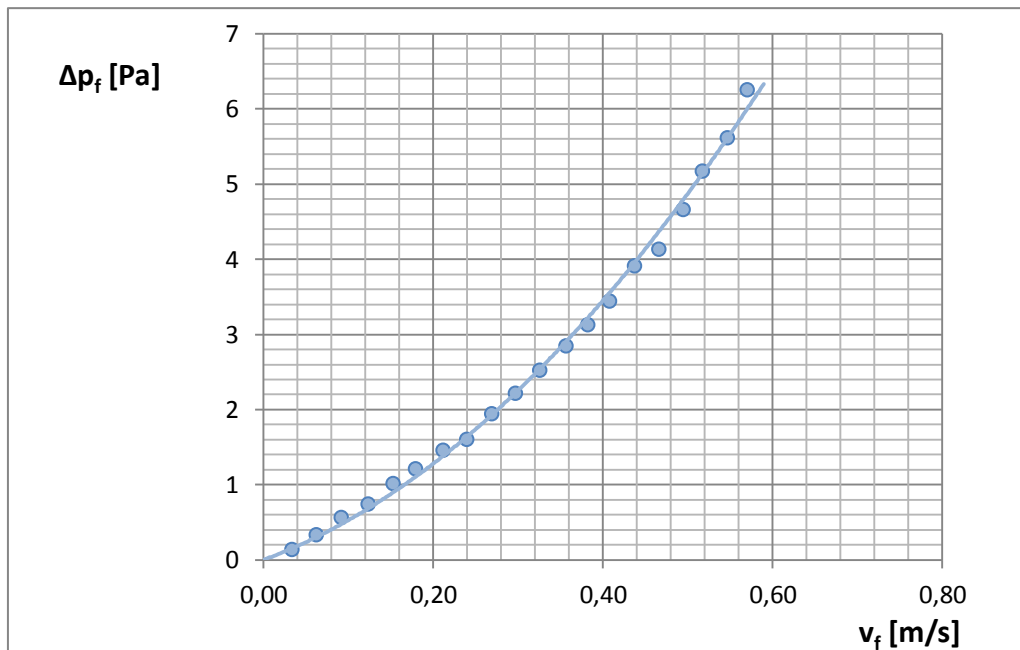
A gyártó ezen kívül hangsúlyozza a légszűrő, sportosságra gyakorolt pozitív hatását is. Jelen esetben a nyomásesés-térfogatáram karakterisztikából leolvasható, hogy maximális térfogatáram (kb.: $q_v \cong 0,12 \left[\frac{m^3}{s} \right]$) mellett a legnagyobb (Unix gyártmány) és legkisebb nyomásesés (K&N gyártmány) közötti eltérés $\Delta p = 38,26 [Pa]$. Tehát a sportosabb légszűrő alkalmazása esetén nyerhető teljesítmény a legnagyobb nyomásvesztésű légszűrővel szemben: $P_{nyer} = \Delta p \cdot q_v \cong 4,6 [W]$. A vizsgált autótípus motorteljesítménye $P_m = 100 [kW]$. Jól láthatóan maximális fordulatszámon az így nyert teljesítmény csak kevéssel növeli a gépjármű motorteljesítményét.

3.2.2 A légszűrők nyomásesés-sebesség karakterisztikájának meghatározása

További összehasonlíthatóság végett ábrázoltam a rendszer térfogatáramából számított, az egyes szűrőfelületeken áthaladó levegő sebességeket, a szűrőkön adódó nyomásesés függvényében.



3.4 ábra: A különböző gyártmányú légszűrők nyomásesése, az átáramló levegő sebességének függvényében



3.5 ábra: K&N gyártmány légszűrő nyomásesése, az átáramló levegő sebességének függvényében

A diagram beállításainál le kellett redukáljam a vízszintes tengelyen ábrázolt sebesség tartományát, mivel a K&N gyártmányú légszűrőn átáramló levegő sebessége nagyobb a többi légszűrőnél mértnél. Azonban az összehasonlíthatóság érdekében külön ennek a légszűrőnek is ábrázoltam a nyomásesés-sebesség karakterisztikáját, a **3.5 grafikonon**.

Az egyes karakterisztikák vizsgálata során felmerülhet a kérdés, hogy az olyan légszűrőknél, amelyeknél két mért nyomásesési pont között csupán pár tized Pascal különbség, mennyire tekinthető pontosnak a kiértékelés. Azonban ezen tartományokban a mérés során a digitális nyomásmérő átlagolási tartományát *medium*-ról ($\Delta t = 3$ [s]), *slow*-ra ($\Delta t = 15$ [s]) állítottam, ami nagyobb mintavételezési tartományból számított nyomásértékek mérését tette lehetővé. Ebből kifolyólag a műszer által kijelzett nyomásértékek jóval lassabban konvergálnak, viszont így nagymértékben megnőtt a mérés pontossága [8]. A mérés egyes hibáira részletesen még a **3.3 fejezetben** visszatérek.

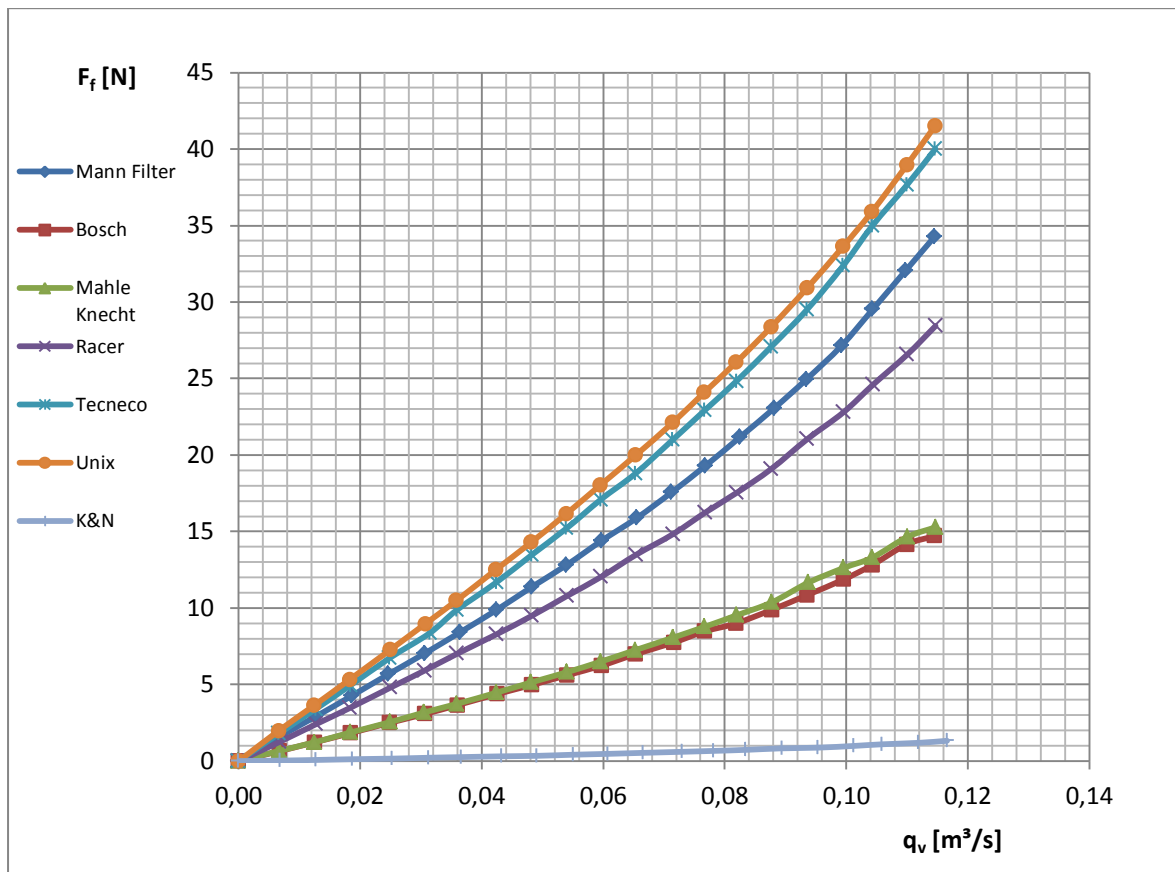
A grafikonokról leolvasható, hogy az áthaladó levegő sebessége a K&N gyártmányú légszűrőnél a legnagyobb azonos nyomásesés mellett. Azonban ez már az említett szemcseleválasztási képesség csökkenésének a jele is lehet, ami a légszűrő funkcióját tekintve nem előnyös. Ezt a mennyiséget viszont nem mértük, így ez önmagában csak feltételezés. Az egyes gyártmányokra nézve a K&N gyártmányú szűrő mellett, a maximális sebességhez tartozó nyomásesés itt is a Bosch és a Mahle Knecht gyártmányú légszűrőknél figyelhető meg, ahol a két karakterisztika ebben az esetben is közel azonosnak tekinthető. Ez nem feltétlenül következik abból, hogy a térfogatáram-nyomásesés jelleggörbéknél is ez a sorrend alakult ki, mivel a szűrőn átáramló levegő sebessége a térfogatáram mellett a szűrőfelület nagyságától is függ. Azonban mind a két típusú karakterisztikát figyelembe véve, közel azonos sorrend állítható fel, az egyes légszűrő gyártmányok között.

3.2.3 A légszűrők felületi erő-térfogatáram karakterisztikájának meghatározása

Érdeemesnek találtam továbbá megvizsgálni azt is, hogy az egyes légszűrők nyomásvesztéséből számolt erő hogyan változik a különböző gyártmányú szűrőkre. Az ehhez szükséges szűrőfelületeket a korábbiakban már meghatároztam (**3.2 táblázat**), illetve a légszűrőkön fellépő nyomásesések értékét is mértem. Ez alapján az 1.21 összefüggés értelmében a szűrőfelületekre ható erő is meghatározható, amelynek nagyságát minden egyes légszűrőre, minden egyes mérési pontban kiszámítottam.

$$F_f = \Delta p_f \cdot A_f \quad (1.21)$$

Az így kapott erők nagyságának értékét a térfogatáram függvényében, grafikonon ábrázoltam (**3.6 ábra**).



3.6 ábra: A különböző gyártmányú légszűrőkre számolt erő a térfogatáram függvényében

Az egyes gyártók a szűrők anyagának megnevezését nem bocsájtják a vásárló rendelkezésére, azonban a **3.6 ábra** alapján levonható erre vonatkozóan némi következtetés, mint pl.: a Bosch és Mahle Knecht gyártmányú légszűrők közel azonos anyagból készülhettek. Hasonlóképpen a Unix és Tecneco gyártmányúak is. Ha a felületi erő azonos (mivel a közel azonos szövésű, anyagi minőségű, de eltérő nagyságú szűrőfelületek mérete és az eltérő nyomásvesztésük szorzata azonos), akkor ez azonos mechanikai tulajdonságokkal bíró szűrőszöveteket jelent.

A grafikonról leolvasható, hogy állandó térfogatáram mellett a K&N gyártmányú légszűrő felületére hat a legkisebb erő a vizsgáltak közül. Ami a fentiek értelmében egyúttal megerősíti azt a kialakításra, anyagra és mechanikai tulajdonságra vonatkozó különbséget, hogy a K&N szűrő pl. porozitása szemmel láthatóan jelentősen eltér a többitől (ld. **3.1 ábrán** látható kialakítás).

3.2.4 A légszűrők árának és szűrési tulajdonságainak összehasonlítása

A mérések során használt légszűrők kereskedelmi árait a **3.3 táblázatban** gyűjtöttem össze. Ezek az árak a UNIX és Bárdi Autó nagykereskedelemben forgalmazott termékekre érvényesek (2013).

3.3 táblázat: Az egyes légszűrők árai

Név	Cikkszám	Ár [Ft]
BMW	13721715881	5821 + ÁFA
Mann Filter	C26110/1	5633 + ÁFA
Bosch	1457429964	2830 + ÁFA
Mahle Knecht	LX105	3149 + ÁFA
Racer	R3152	2135 + ÁFA
Tecneco	AR334PM	2389 + ÁFA
Unix	P161 H13-02-2564	1130 + ÁFA
K&N	33-2059	17849 + ÁFA
K&N Recharger Air Filter Cleaning Kit	99-5000EU	3519 + ÁFA

A fenti árlistából jól látszik, hogy az eredeti gyári légszűrő árával szinte csak a Mann Filter gyártmányú egyezik meg. Így az eddigi vizsgálatok mellett tehát érdemes lehet megvizsgálni, hogy az egyes szűrési tulajdonságok, milyen arányban vannak a légszűrők áraival. A nyomásesés–térfogatáram, illetve a nyomásesés–sebesség karakterisztika szempontjából a Bosch, a Mahle Knecht és a K&N gyártmányú szűrők rendelkeznek a legjobb tulajdonságokkal, azonban az utóbbi közel háromszor annyiba kerül, mint a gyári, illetve közel hatszor többbe, mint a másik kettő. A másik véglet ár szempontjából a Unix, Racer és Tecneco gyártmányúak, amik bár olcsóbbak, viszont a rajtuk átáramló levegő nyomásvesztése is jóval nagyobb.

Fontos megjegyezni, hogy költségessége ellenére, nem feltétlenül lehet rossz választás egy K&N gyártmányú szűrő, amennyiben azt nem normál utcai használatra vásároljuk. A gyártó ugyanis ezt a terméket úgy forgalmazza, hogy amennyiben az elkoszolódik és idővel eltömődne a szűrőfelülete a rajta összegyűlt szennyező anyagok miatt, akkor a szűrőt egyszerűen meg lehet tisztítani, vagyis lemosható, amit így elméletileg sosem kell majd cserélni. Ezzel ellentétben a többi szűrő nem mosható, mivel azok lamellái döntő többségében valamilyen papír alapú anyagból készülhettek, így bekoszolódás esetén érdemes újra cserélni azt. A költségeket tekintve tehát hosszútávon elképzelhető, hogy a K&N gyártmányú légszűrő a jó választás, viszont nem az ún. gondozásmentes, laikus felhasználóknak ajánlott.

3.2.5 Összegzés

A különböző gyártmányú légszűrőket a fenti szempontok alapján összehasonlítva, hétköznapi használatra a Bosch és Mahle Knecht gyártmányú légszűrők tűnnek a legjobb választásnak, mind vizsgált karakterisztikáik, mind pedig árak szempontjából. Ennél rosszabbak a vizsgált szűrési tulajdonságai a Racer, a Unix és a Tecneco légszűrőknek, viszont az árak is alacsonyabb. Karakterisztikái szempontjából ide sorolható még a Mann Filter gyártmányú is azonban ez drágább, mint az eddigiek, ezért vélemény szerint ez talán a legkevésbé jó választás. Az általam megítélt sorrendet az egyes légszűrőkre nézve a **3.4 táblázat** tartalmazza.

3.4 táblázat: Az egyes légszűrők javasolt alkalmazásának sorrendje

<i>gyártmány</i>	<i>vizsgált szűrési karakterisztikák alapján</i>	<i>árak alapján</i>	<i>összegezve</i>
Bosch	2.	4.	1.
Mahle Knecht	3.	5.	2.
Racer	4.	2.	3.
Tecneco	6.	3.	4.
Unix	7.	1.	5.
Mann Filter	5.	6.	6.
K&N	1.	7.	1. vagy 7.

Nem soroltam ezek közé a K&N gyártmányú légszűrőt, bár a vizsgát jelleggörbéi alapján jobb, mint az összes többi. Azonban az ára és a fenntartási költsége igen magas, ami a tisztás során a szűrőfelületére újra felvitt nedves olajfilm rétegből adódóan újabb költségeket von maga után (K&N Recharger Air Filter Cleaning Kit). Így tehát a kérdés nagyon összetett és szubjektív, hogy melyik légszűrőt a leginkább ajánlott használni. Ha tehát valakinek inkább számít a magasabb motorteljesítmény elérése (még ha ez nem is jelentős mértékű), akkor a K&N gyártmányú légszűrő használata erre a legalkalmasabb. Azonban ha valaki nem akar túl magas költségeket, akkor viszont a Bosch gyártmányú a leginkább ajánlható légszűrő.

Ez az összehasonlítás természetesen csak az általam vizsgált légszűrőkre, illetve azok karakterisztikái és költségei alapján értelmezhető. Fontos szempont még egy légszűrő jóságának tekintetében, hogy milyen a porleválasztási hatásossága. Azonban ennek mérésére a szakdolgozatom során nem került sor. Így csupán a tiszta szűrők nyomásveszteségei és árai alapján nem érdemes döntést hoznunk.

A fentiek alapján, a numerikus áramlástan szimulációk során már csak 3 légszűrőt vizsgáltam meg. Ennek oka az volt, hogy megfelelő hálómínőségű modellel csupán ennyi véges térfogatú modell elkészítése fért bele az időmbe. Ezek név szerint a Mann Filter, a Bosch és a K&N gyártmányú légszűrők. A választásomat az indokolja, hogy a nyomásesés-térfogatáram, illetve a nyomásesés-sebesség karakterisztikákat összehasonlítva mindkét esetben is a legkisebb nyomásesés a K&N szűrőn adódott. Ezt

követően kb. azonosan alakult a Bosch és a Mahle Knecht gyártmányú légszűrők egyes karakterisztikái, ami közül a Bosch gyártmányút választottam ki további vizsgálatok céljára. Ezen kívül szerettem volna még megvizsgálni egy „kevésbé jól teljesítő”, de a BMW által ajánlott légszűrőt is, ezért esett a választásom a Mann Filter-re. Tehát a Mann Filter, a Bosch és a K&N gyártmányú légszűrőket választottam ki, azok véges térfogatú modelljének megalkotása céljából.

3.3 Hibaszámítás

Mint minden mérés során, esetemben is elengedhetetlen volt megvizsgálni, hogy az általam mért értékek pontossága, mennyire közelíti a valóságot, illetve, hogy az egyes mennyiségeket milyen hibák terhelik. A mérés során használt mérőműszereket az **1.1 táblázatában** már korábban összegyűjtöttem. Az egyes műszerek abszolút hibáját tanszéki mérési segédletekből [6], illetve némely műszer internetről letöltött katalógusából kerestem ki [8], [9], [10].

A mért mennyiségek szempontjából a térfogatáram mérése volt kulcsfontosságú, mivel a későbbiekben ebből határoztam meg az átáramló levegő sebességét, illetve Reynolds-számát az egyes keresztmetszeteken. Így tehát ennek a mért mennyiségnek a relatív hibáját számítottam ki az egyes mérési pontokban, az 1.122-es összefüggés alapján.

$$\frac{\delta q_v}{q_v} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta}\right)^2 \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4}\right)^2 \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta \Delta p_{MP}}{\Delta p}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\left(\frac{\delta T_0}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\delta p}{p}\right)^2\right)} \quad (1.22)$$

A kifejezésben szereplő d és D átmérők meghatározása mindkét esetben tolómérővel történt, így ezek abszolút mérési hibája $\delta d = \delta D = 0,05 [mm]$ -nek vehető figyelembe. A C átfolyási tényező és az ε kontrakciós tényező relatív hibájának kiszámítását a [6] mérési segédlet segítségével az alábbi 1.23 és 1.24 összefüggésekből tudtam meghatározni.

$$\frac{\delta C}{C} = (1.667\beta - 0.5)[\%] \quad (1.23)$$

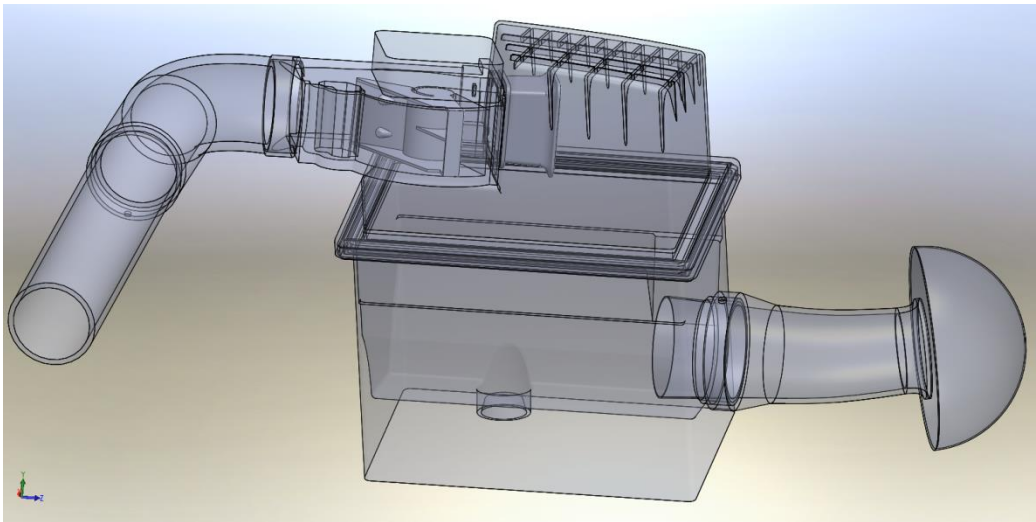
$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = 4 \frac{\Delta p_{MP}}{p_1} [\%] \quad (1.24)$$

Az így kiszámított térfogatáramok relatív hibájának értéke minden egyes mérési pontban, táblázatos formában, a Mellékletek (**M.4.1.-M4.7.**) között megtalálhatóak. Összességében elmondható, hogy a térfogatáram mérés relatív hibája, egyik mérési pontban sem haladja meg a 0,77%-ot. Ez alapján ki merem jelenteni, hogy az általam elvégzett mérés megbízhatónak minősíthető.

4 A légszűrőrendszer CAD modellje

4.1 Előzmények

A véges térfogatú szimulációk létrehozásához elengedhetetlen az egyes alkatrészek, és így a légszűrőrendszer 3D-s modelljének a megléte. A modell megalkotásához nyilvánvalóan, a valóságban is, a mérés során is használt, légszűrőrendszer pontos méreteinek ismerete szükséges. Műszaki rajzok hiányában az egyetlen módszer a valóságos geometria méreteinek a lemérése az egyetlen lehetőség. Fontos megemlíteni, hogy egy korábbi diplomamunka [11] során, amely ugyanezt a légszűrőrendszert más szempontból vizsgálta, Kórik Zoltán által már lemodellezésre került a majdnem teljes légszűrőrendszer. Sajnos ez a modell a Solid Works egy régebbi típusában készült és számos olyan kompatibilitási problémába ütköztem, ami miatt a legtöbb alkatrészt le kellett modellezem újra.



4.1 ábra: A légszűrőrendszer modellje Kórik Zoltán diplomamunkájából

Azonban így is nagy segítséget jelentett, mivel a geometriai méretek többsége így már adott volt és nem kellett minden egyes alkatrész, minden méretét külön-külön lemérnem. A jelen vizsgálat tárgyát képező légszűrő modellje, a már említett korábbi diplomamunkában csupán egy téglatesttel modellezett porózus zóna volt. Így a pontos méretek meghatározása, illetve a CAD modell elkészítése már teljes egészében az én feladatomból volt.

4.2 Az alkatrészek geometriája

A CAD modellt a Pro Engineer Wildfire 5 program segítségével alkottam meg. A létrehozott modell geometriájának kialakításában nagyon fontos szempont volt az egyes alkatrészek belső felületének a pontos kialakítását követni. Erre azért volt szükség, mivel légszűrőn átáramló levegő a rendszer belsejében halad. Épp ezen okból kifolyólag a külső geometria kialakítását már közel sem végeztem el ennyire pontosan, tehát ahol lehet egyszerűsítésekkel éltem, mivel ezeknek a későbbi áramlási szimulációt tekintve nincs szerepe, így elhanyagoltam őket. Ezen egyszerűsítéseket **4.1 táblázat** tartalmazza alkatrészekre lebontva.

4.1 táblázat: A modell leegyszerűsítései alkatrészekre lebontva

<i>Alkatrész</i>	<i>Egyszerűsítés</i>
Beömlő csőcsonk	külső peremek
Légszűrőház alsó fele	csatlakozó elemek, csavarok a belő oldalon
	merevítő bordák
	gömbült felületek
Légszűrőház felső fele	terelőlapok
	csatlakozó elemek
	merevítő bordák
	gömbült felületek
	rögzítő kapcsok
Légszűrő	szűrő lamella $m=0$ vastagságú felületként modellezve
	gumiköpenyek letörései, lekerekítései

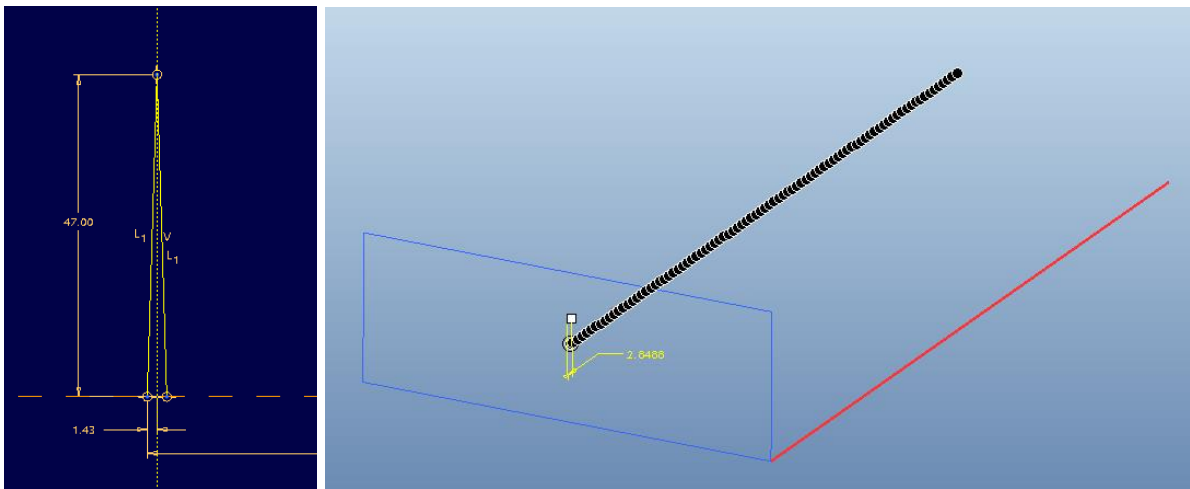
Azonban voltak olyan részletek is, amelyeket az egyes alkatrészeknél nem egyszerűsíthettem le, mivel nagyon sokat számított a pontos, valóság-hű geometria kialakítása. Az egyes alkatrészek pontosan kialakított részleteinek listáját a **4.2 táblázat** tartalmazza.

4.2 táblázat: A modell kirészletezése alkatrészekre lebontva

<i>Alkatrész</i>	<i>kirészletezés</i>
Beömlő csőcsonk	belső felület görbületei
	légszűrőházba való benyúlás
Légszűrőház alsó fele	belső felületek dőlésszöge
	illeszkedő peremek
Légszűrőház felső fele	ívelt belső felületek
	felső lap bordái
	illeszkedő peremek
Légszűrő	lamellák dőlésszöge, kiosztása
Terelőelem	falak kialakítása, illeszkedése
	lekerekítések

Mint ahogy az a felsorolásban is szerepel, a légszűrő kialakítása során az egyes lamellákat 0 vastagságú felület elemként hoztam létre. Erre azért volt szükség, mert bár a valóságban ezeknek a felületeknek van fizikai vastagsága, a véges térfogatú modell generálása során létrehozandó háló nagyon kisméretű elemeket, és ez által nagyon magas elemszámot eredményezne. Emellett a numerikus hibák elkerülése érdekében véges vastagságú elemeket javasolt több cellasorból kialakítani, ami viszont így még további elemszám ugrást eredményezne. A lamellákat, az azokat összefogó gumiköpeny irányából további felületelemekkel kellett lezárni, mivel a valóságban is, ezek a felületek zártak (összeragasztottak). Erre (a valóságban és a modellben is) azért van szükség, hogy az átáramló levegő ezeken a felületeken keresztül ne kerülhesse ki a szűrést hivatott felületeket.

Első lépésben megalkottam a szűrőfelületek lamelláit, melyeket a síkban mindkét oldalán egy-egy vázlat segítségével definiáltam. Ennek az alakosságának a kialakítását a **4.2 ábrán** szemléltettem. A így létrejövő vázlatok mindegyike egy-egy a vízszintessel közel 90°-ban álló téglalapot formált, amelyek létrehozását követően definiáltam az azok által közrefogott 0 vastagságú felület elemeket. Így létrejött egy teljes lamellapár, amikből aztán egy előre definiált irány szerint, lineáris kiosztással, adott tartományon belül, a lamella számokat parametrikusan beállítva létrehoztam a teljes szűrőfelület. Az egyes dimenziók parametrikus változtathatóságának beállításával az volt a célom, hogy a későbbiekben hasonló kialakítású, de pl. eltérő lamella számú szűrő modellje, minimális változtatásokkal, gyorsan és egyszerűen létrehozható legyen. Ugyanezen elv mentén definiáltam az egyes lamellák oldalát lezáró felületeket is.



4.2 ábra: A légszűrő lamelláinak parametrikus kialakítása

A légszűrők modellezésekor fontos volt még a lamellákat összefogó gumiköpeny kialakítása, abból a szempontból, hogy a légszűrőház alsó és felső részének érintkező felületein a gumiköpeny a valósághoz híven jó tömítést biztosítson annak érdekében, hogy a levegő ne szökhesse el az illesztéseknél. Ebből kifolyólag bizonyos mértékig el kellett térjek a mért méretektől, mivel a valóságban a gumiköpeny rugalmas, képlékeny anyagként viselkedik, a modellben viszont solid, merev anyagként. Ezeket a méretbeli eltéréseket légszűrőnként a **4.3 táblázatban** foglaltam össze.

4.3 táblázat: A lamellákat összefogó gumiköpeny méretváltoztatásai az egyes légszűrők szerint

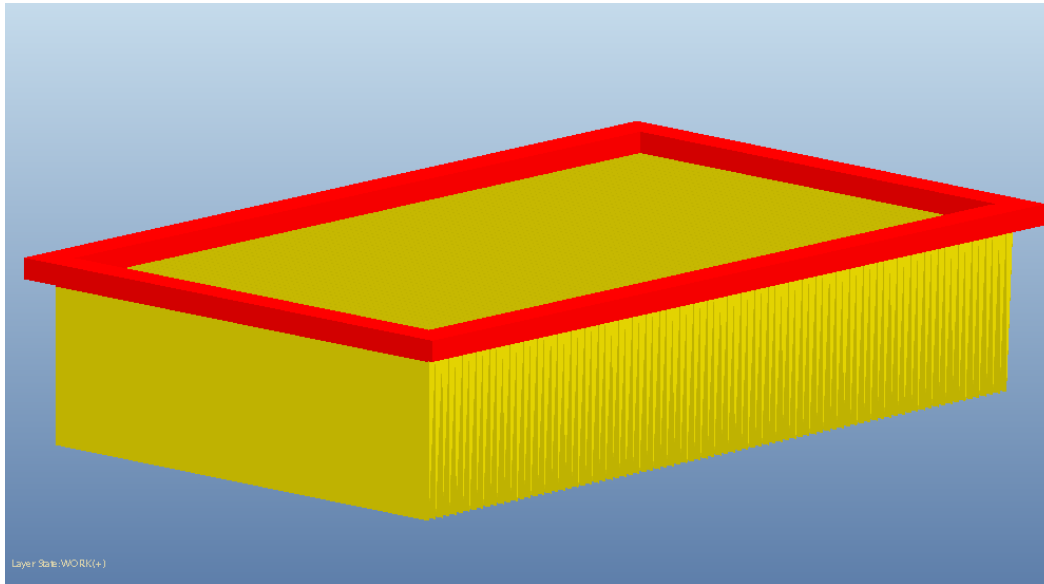
	a_{gumi}		b_{gumi}	
	<i>eredeti</i>	<i>változtatott</i>	<i>eredeti</i>	<i>változtatott</i>
Mann Filter	258	257	150	150
Bosch	256		148	
K&N	255		150	

	c_{gumi}		h_{gumi}	
	<i>eredeti</i>	<i>változtatott</i>	<i>eredeti</i>	<i>változtatott</i>
Mann Filter	10	10	10	6
Bosch	9		11	
K&N	8,5		9	

A fenti táblázatok fejlécében lévő dimenziók közül a_{gumi} a köpeny hosszát, b_{gumi} a köpeny szélességét, c_{gumi} a köpeny vastagságát és h_{gumi} pedig annak magasságát jelöli.

Természetesen létre lehetett volna hozni az említett tartományt rugalmas anyagként is, azonban ezzel a modell mérete és összetettsége megnőtt volna, illetve a későbbi áramlástani szimulációk is nagymértékben bonyolódtak volna.

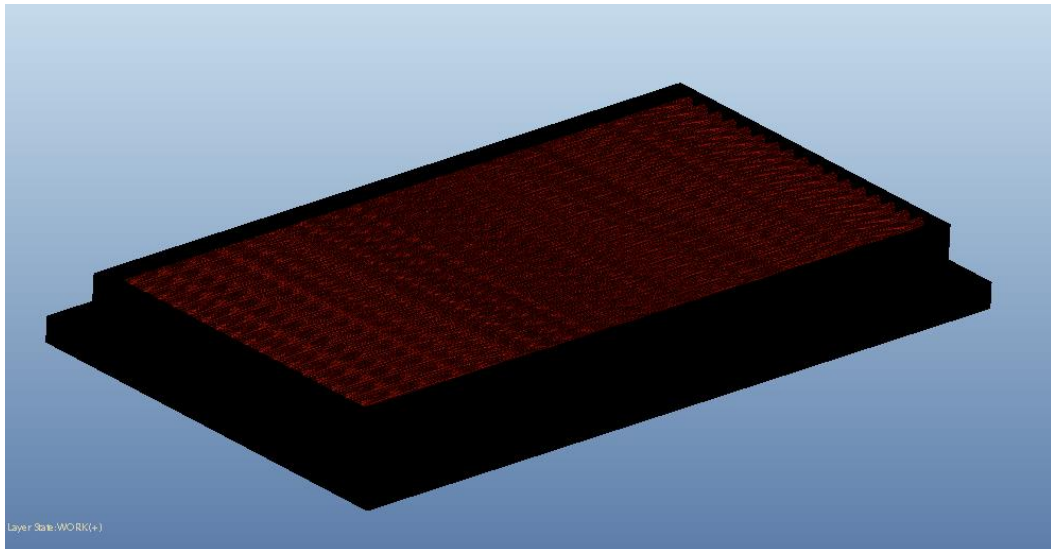
A fenti lépések összességéből létrejött tehát a légszűrő modellje, aminek kialakítását a **4.3 ábra** hivatott szemléltetni.



4.3 ábra: Mann Filter gyártmányú légszűrő CAD modellje

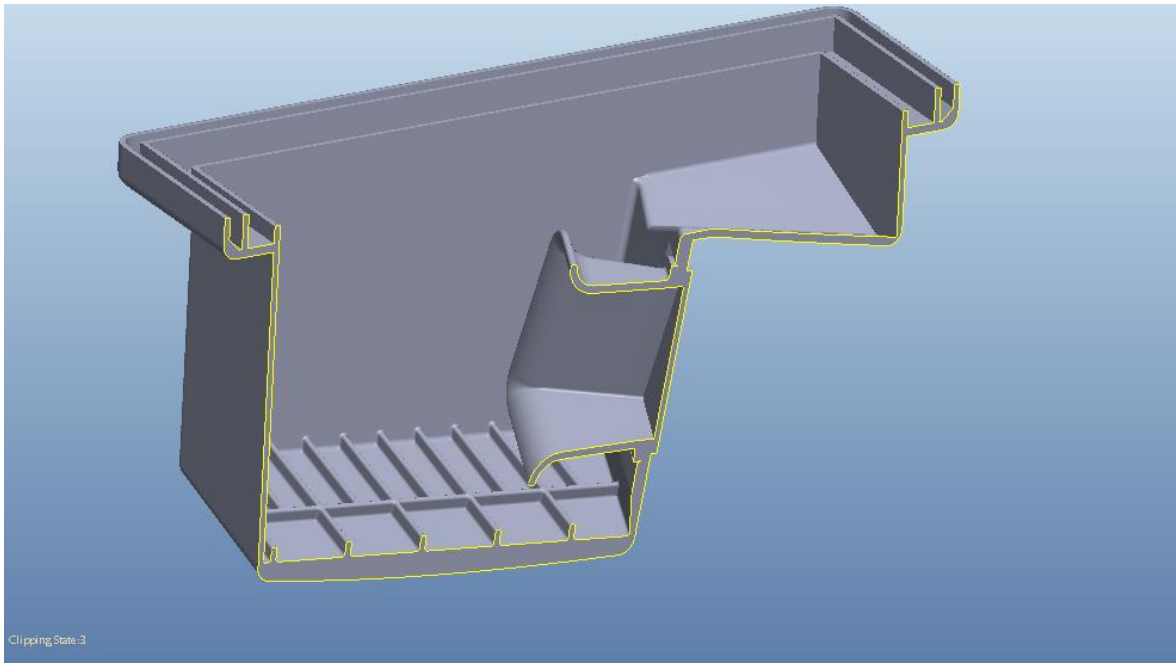
Ez a kialakítás azonban csak a Mann Filter és a Bosch gyártmányú légszűrőkre igaz. A K&N légszűrő lamelláinak elhelyezkedése és kialakítása eltér az eddigiektől, mint ahogy azt már a **3.1 ábrán** bemutattam. Így tehát az itt létrehozott lamellák esetén nem pusztán téglalapok alkotják a szűrő felületet, hanem az azokat összekötő lekerekített szakasz is. Így tehát a létrehozott lamellapár itt 4 elemből tevődik össze, az eddigi kettő helyett. A létrejött felület elemekből, a fentiekben már alkalmazott lineáris, vonal menti kiosztás segítségével létrehoztam a teljes szűrőfelületet.

Ennél a légszűrőnél a lamellákat összefogó gumiköpeny nem pusztán egy keret, hanem a szűrő külső oldalfalait is alkotja, aminek a későbbiekben a levegő áramlásának modellezése során fontos szerepe lesz. Ehhez mérten az oldalfalak kialakításánál nem alkalmaztam semmilyen jellegű egyszerűsítést, azonban az alsó keret résznél a már említett módon, elhagytam az egyes lekerekítéseket, illetve letöréseket. Az így létrejött légszűrő modelljét a **4.4 ábra** szemlélteti.



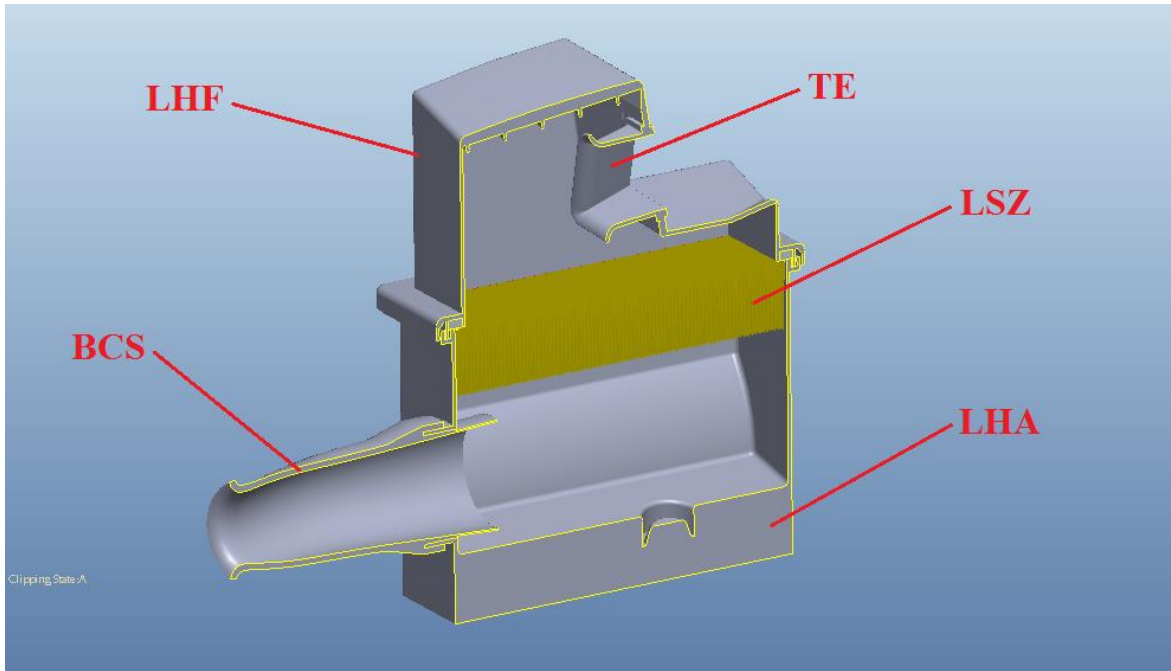
4.4 ábra: K&N gyártmányú légszűrő CAD modellje

Szintén szükséges modellezési lépés volt a légszűrőház felső felének a belső bordázata. Korábbi tapasztalatok [11] arra mutattak rá, hogy áramlástanilag fontos jelentőségük van így nem elhanyagolhatóak. Hasonlóan fontos szerepet tölt be a légszűrőház felső részéhez belülről csatlakozó terelő elem is, aminek a pontos, valóság-hű kialakítása szintén elengedhetetlen volt. Ezek elrendezését és kialakítását a **4.5 ábra** mutatja meg.



4.5 ábra: A légszűrőház felső részének belső bordázata

Mint azt a korábbiakban említettem a légszűrőrendszer részét képező légtömegmérő berendezés vizsgálata nem volt része a feladatnak és mivel a légszűrőn végbemenő nyomásesés szempontjából sincs jelentősége, így annak modelljét nem készítettem el. Az így elkészített alkatrészeket összekényszerelve a **4.6 ábrán** látható elrendezés szerint létrejött a rendszer vizsgált részének geometriája.



4.6 ábra: A légszűrőház CAD modelljének hosszszelvényi képe, az egyes elemekkel feltüntetve

BCS: beömlő csőcsonk

LHA: légszűrőház alsó fele

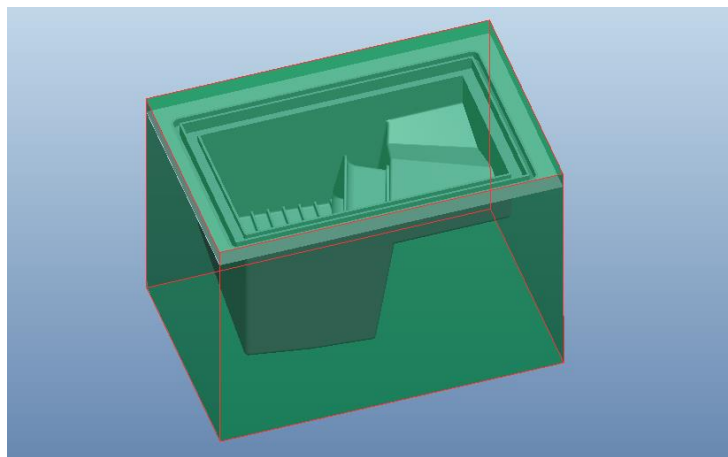
LHF: légszűrőház felső fele

LSZ: légszűrő (itt: Mann Filter gyártmányú)

TE: tereleőelem

4.3 Az egyes alkatrészek térfogatainak megalkotása

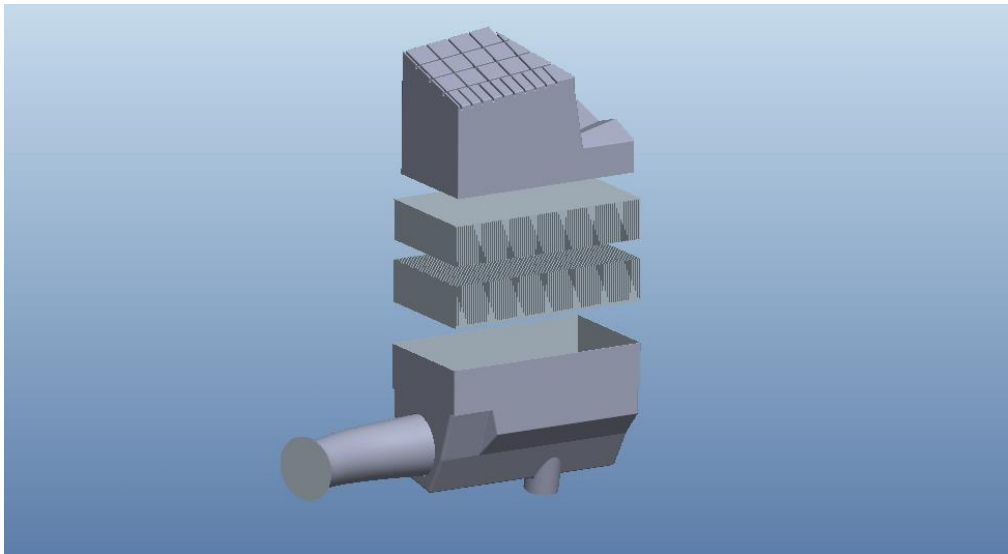
Az így létrejött modell, a véges térfogatú számítások során ebben a formájában nem használható. Ehhez ugyanis szükséges a rendszer által magába foglalt térrész, mint térfogatelem modellje. Ennek létrehozásával első próbálkozásra Boole-műveletet próbáltam alkalmazni, azonban ezen parancs során a program csak zárt, tömör testekkel tud dolgozni. Esetemben az egyes alkatrészek üreges kialakítása miatt ez nem volt lehetséges. A problémára a megoldást egy adott alkatrész öntőformája jelentette. Ennek során létre lehet hozni egy olyan alakajátosságot, ami akkor jönne létre, hogyha az adott alkatrészt ki szeretnénk önteni (pl. műanyagból, vagy fémből).



4.7 ábra: A légszűrőház felső részének öntőszerkezete (Pro Engineer Manufacturing)

Ehhez a művelthez a Pro Engineer Manufacturing beépülő modulját használtam. Ennek során beimportáltam az előzőekben létrehozott alkatrészek, illetve rész összeállítások modelljét, és körük létrehoztam egy adott kiterjedésű, véges térfogatú téglatestet, úgy hogy az minden irányból magába foglalja az alkatrészeket. Majd egy két félből álló öntőformát hoztam létre, amihez definiálni kellett azt a felszínt, amely mentén a szerszámot szét lehet majd szedni. Legenerálva az iménti modellt már megkaptam a szükséges alkatrészek öntőformáit, amelyek közül a belső szerszám geometriája már tartalmazta a számomra fontos térfogatú térrész modelljét.

Az így keletkező térfogatelemet egyben is létre lehetett volna hozni, a már vázolt (**4.2 ábra**) elrendezés szerint. Azonban a későbbi áramlási szimulációk során a rendszerbe áramló levegőt alapvetően 2 térrészre bontva szerettem volna létrehozni: a légszűrő előtti és utáni térfogati elemre. Ehhez létrehoztam a beömlő csöcsönköt és a légszűrőház alsó felét, illetve a légszűrőház felső felét és a terelő elemet tartalmazó rész öntőformáit. Ezen térrészekbe nem vettem bele a légszűrő előtti, illetve utáni térfogatú részeket, mivel a modell alkotás során az is célom volt, hogy a létrejött alaksajátosságban a légszűrő modellje cserélhető legyen a többi gyártmány vizsgálatának céljából. Így ezen két térrész öntőszerszámát külön-külön hoztam létre, illetve mivel az egyes gyártmányok kialakításában van különbség, ezért azoknak a modelljeit is külön-külön készítettem el. Tehát ezek alapján létrejött a vizsgálandó légszűrőrendszer térfogati modellje, melynek összeállítását a **4.8 ábra** szemlélteti.



4.8 ábra: A légszűrőrendszer térfogati elemeinek robbantott képe

5 A légszűrőrendszer véges térfogatú modellje

A mérés során megvizsgált és összehasonlított hét különböző gyártmányú légszűrőből kiválasztott három darabnak készítettem el a véges térfogatú modelljét. Ehhez az Ansys 14.0 Workbench típusú szimulációs szoftvert használtam, illetve ezen belül a FLUENT modulját.

5.1 További mennyiségek meghatározása az áramlástani szimulációkhoz

A létrehozni kívánt áramlástani szimulációk megalkotásához szükség van még további mennyiségek meghatározására. Erre azért van szükség, mert az általam létrehozott légszűrők egyes modelljeinek szűrőfelületét az analízisek során porózus felületként szeretném modellezni. Porózus zóna megadása esetén azonban szükséges a 1.25 összefüggésben szereplő konstansok, α permeabilitás és C_2 tehetetlenségi ellenállástényező megadása [12]. Fontos megjegyezni, hogy ez az összefüggés csak homogén porózus zónákra érvényes, aminek a légszűrő kialakítása és tulajdonságai eleget is tesz.

$$\nabla p = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho |v|v\right) \quad (1.25)$$

Ha figyelembe vesszük továbbá azt is, hogy a mérés kiértékelés során arra a következtetésre jutottam (**3.1 fejezet**), hogy a légszűrőn keresztül áramló levegő lamináris áramképű, úgy az összefüggés az 1.26 szerint egyszerűsödik ki, mivel turbulens áramlás hiányában $C_2 = 0$. Ez Darcy-törvénye, ami a porózus zóna nyomásgradiensét írja le lamináris áramlású közeg esetén [12],[13].

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (1.26)$$

Ez alapján a mérés során meghatározott, a légszűrőn mért nyomásesésből, illetve az ebből meghatározott, a szűrőfelületen keresztülaramló levegő v sebességéből már meghatározhatóak a keresett konstansok. Az összefüggésben szereplő μ viszkozitási tényezőt, illetve ρ sűrűséget, szintén a mérés kiértékelése során az egyes légszűrőkre már korábban meghatároztam. Amennyiben feltételezzük, hogy a porózus rétegen a közeg csak arra merőlegesen áramolhat keresztül úgy az 1.25 összefüggés általános esetben, a már korábban is említett 1.20 szerint egyszerűsödik ki.

$$\Delta p = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2\right) \Delta m$$

Az α és C_2 konstansok az egyes légszűrőkre, a mért levegő sebességének a nyomásesés függvényében történő ábrázolásából meghatározhatóak. Az ábrázolt pontsor jellegéből következtetni lehet az áramlás áramképének típusára is. Amennyiben lineáris jellegű, úgy lamináris, ha viszont másodfokú (polinomiális) akkor turbulens az áramlás. A konstansok meghatározása úgy történik, hogy a diagramon ábrázolt pontsorra egy trendvonalat illesztnek. Ennek az egyenesnek, vagy görbének az egyenletéből (1.27) az alábbi

összefüggések (1.28 és 1.29) segítségével már meghatározhatóak az egyes konstansok [12].

$$y = Ax + Bx^2 \quad (1.27)$$

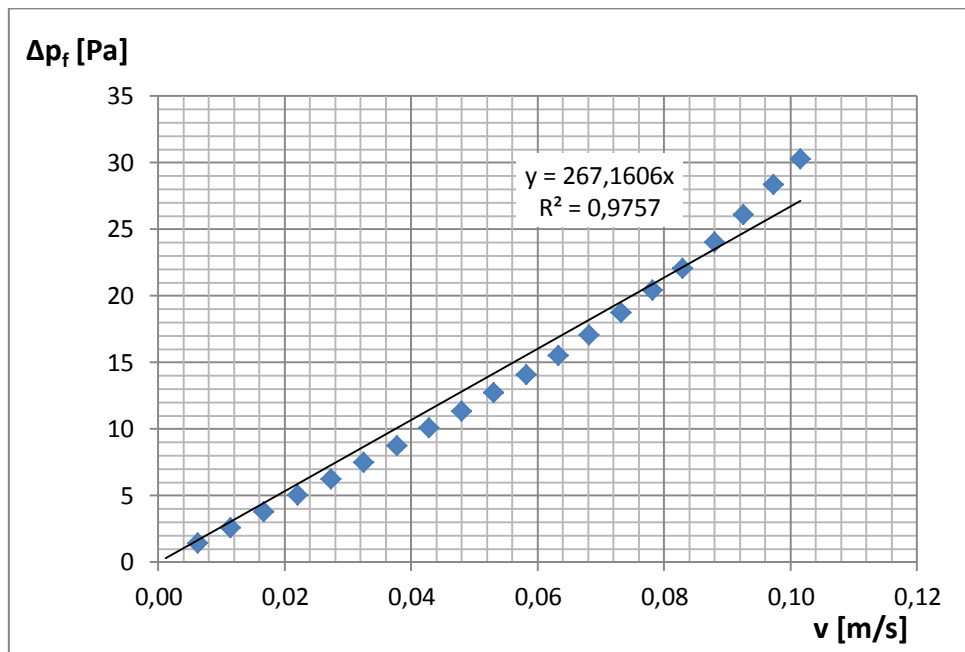
$$A = \frac{\mu}{\alpha} v \quad (1.28)$$

$$B = C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1.29)$$

Mivel azonban tudjuk, hogy a légszűrő átáramló levegő áramképe lamináris, ezért a mért adatsorra lineáris trendvonalat illesztve, az így kapott egyenes egyenletéből már meghatározható az α permeabilitás, az egyes légszűrőkre.

5.1.1 Az egyes légszűrőkre vonatkozó permeabilitások meghatározása

Az alábbiakban (5.1-5.3 ábra) az egyes vizsgált légszűrők nyomásesés–sebesség karakterisztikáinak pontsorát ábrázoltam.



5.1 ábra: Mann Filter gyártmányú légszűrők nyomásesése, az átáramló levegő sebességének függvényében

A diagramról leolvashatóak az egyes egyenesek egyenletei. Ezek alapján az előzőekben említett módon már meghatározhatóak az egy permeabilitási tényezők értékei. Elsőként a Mann Filter gyártmányú légszűrőre határoztam ezt meg, az alábbiak szerint az illesztett egyenes egyenletének (1.30) segítségével. Az illesztett egyenes mellett kiírt R^2 , vagy más néven determinációs együttható értéke 0 és 1 közötti szám, amely azt mutatja meg, hogy a trendvonal becült értékei milyen közel állnak a valós adatokhoz. A trendvonal akkor a legmegbízhatóbb, amikor a hozzá tartozó R-négyzet értéke 1 vagy ahhoz minél közelebbi

érték. Jól látható tehát, hogy ez az érték a Bosch, a Mann Filter esetén $R^2 > 0,975$ és a K&N gyártmányú légszűrő esetén is $R^2 > 0,93$.

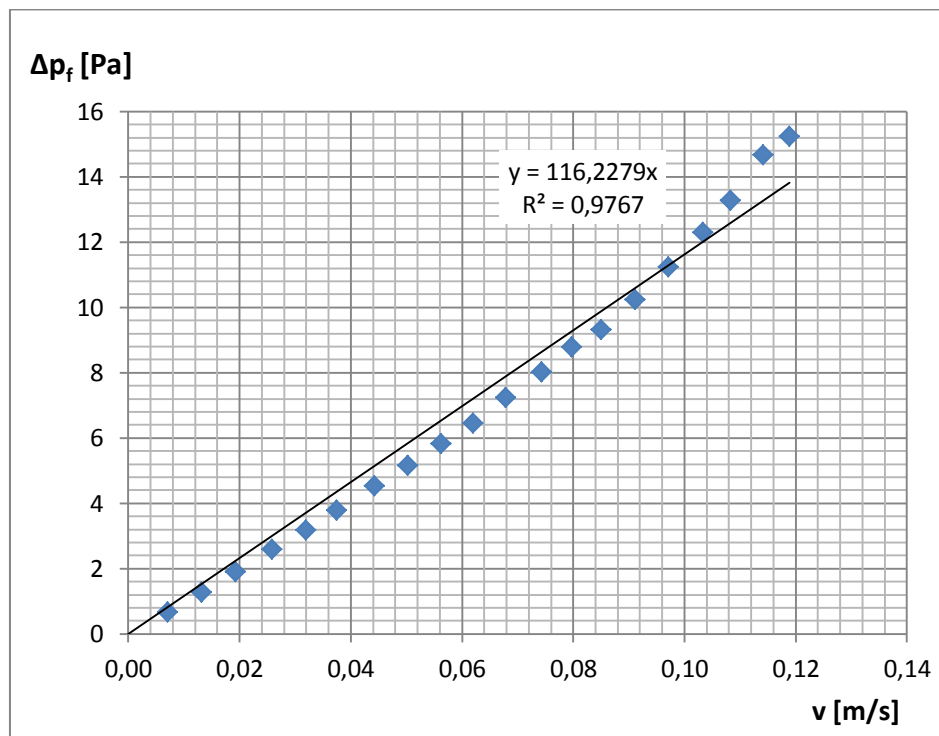
$$y = Ax = 268,07x \quad (1.30)$$

$$A = \frac{\mu \cdot \Delta m}{\alpha} \quad (1.31)$$

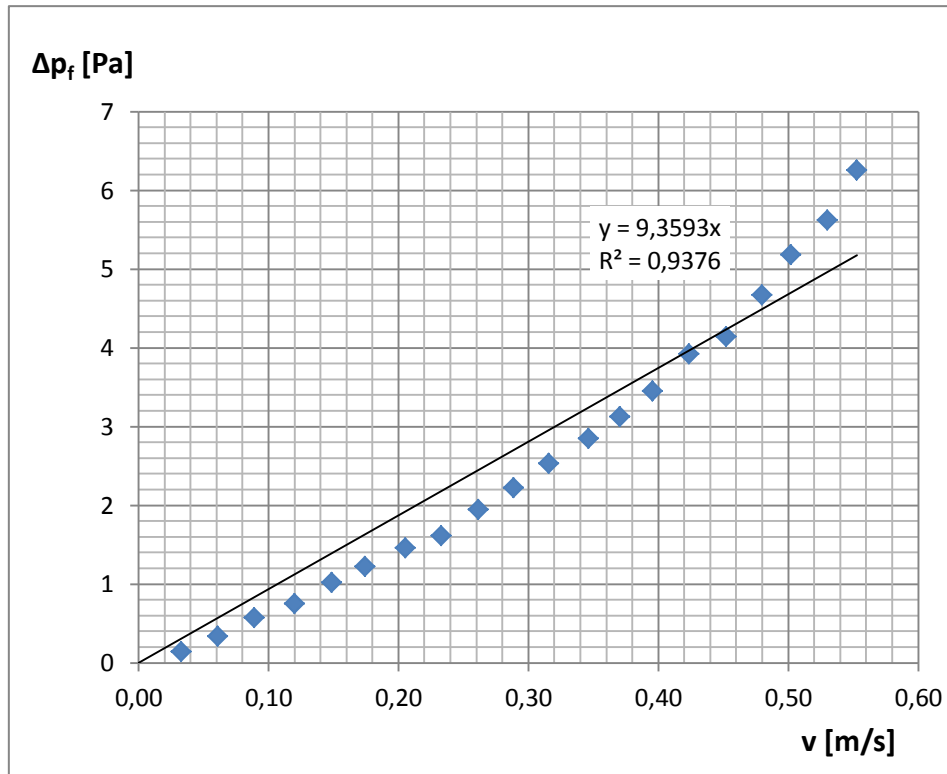
Ahol az 1.31 összefüggésben a légszűrő szűrőfelületének vastagsága $\Delta m = 2 \cdot 10^{-4} [m]$ és az azon átáramló levegő dinamikai viszkozitása $\mu = 1,8209 \cdot 10^{-5} [Pas]$, amiből a Mann Filter gyártmányú légszűrő permeabilitása $\alpha = 1,3631 \cdot 10^{-11} [m^2]$. A további kéttípusú (Bosch és K&N) légszűrőre vonatkozó permeabilitások értékét hasonlóképpen az **5.2** és **5.3 diagramok** segítségével tudtam meghatározni. A számítások főbb paramétereit és a szükséges sűrűdési ellenállás értékét az **5.1 táblázatban** foglaltam össze. Az így számolható α permeabilitás reciprokából határozható meg a szűrőfelület sűrűdési ellenállás tényezője is ($1/\alpha$). Erre az értékre a szimulációk során azonban csak akkor volna szükség, ha légszűrőt porózus térfogati részként (*porous media*) modellezném, mivel a FLUENT peremfeltételként csak itt kérné ennek megadását.

5.1 táblázat: Az egyes légszűrők főbb paramétereit a numerikus szimuláció szempontjából

	$\Delta m [m]$	$\mu [Pas]$	A [N/ms]	$\alpha [m^2]$
Mann Filter	0,0002	1,8209E-05	267,1606	1,3631E-11
Bosch	0,0002	1,8218E-05	116,2279	3,1349E-11
K&N	0,002	1,8298E-05	9,3593	3,9102E-09



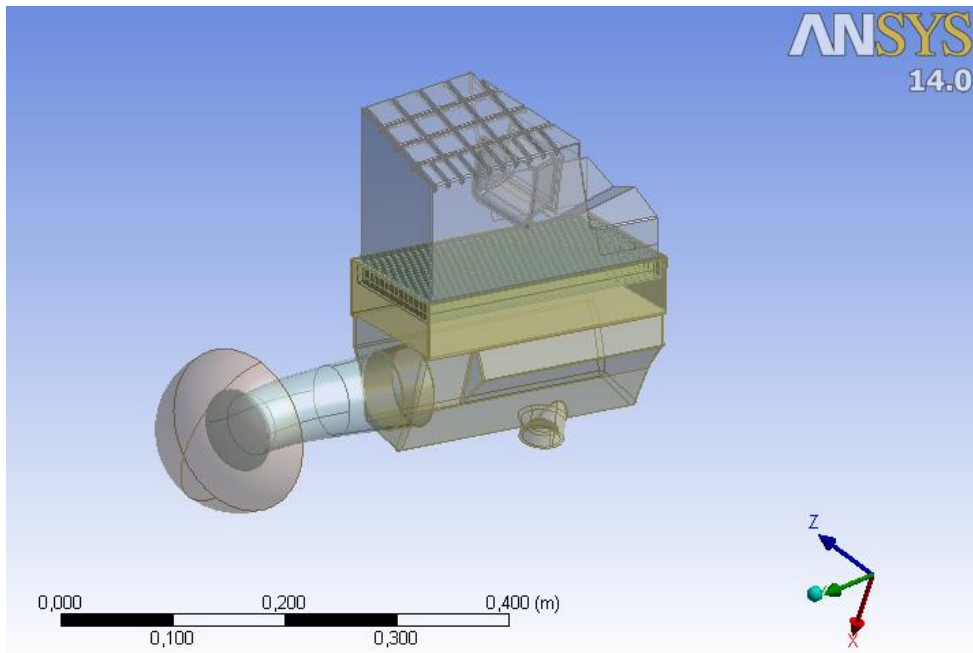
5. 2 ábra: Bosch gyártmányú légszűrők nyomásesése, az átáramló levegő sebességének függvényében



5.3 ábra: K&N gyártmányú légszűrők nyomásesése, az átáramló levegő sebességének függvényében

5.2 A véges térfogatú modell kialakítása FLUENT-ben

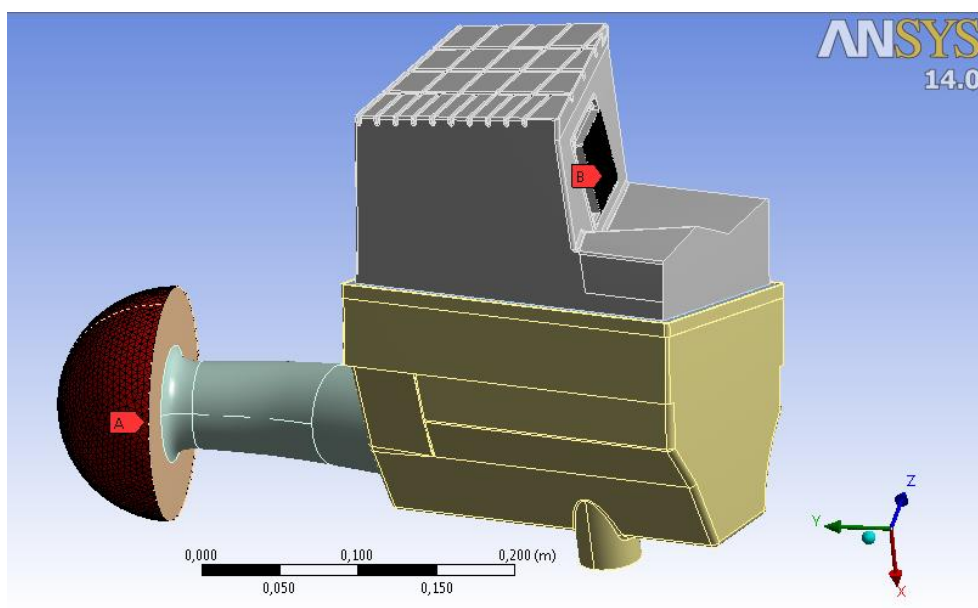
A **4. fejezetben** létrehozott térfogati elemek geometriát STEP formátumba konvertáltam, illetve ezeket a FLUENT Geometry Modeller-ében importáltam. Itt a későbbi hálózasi műveletek miatt részekre bontottam az egyes térfogati elemeket, amivel az volt a célom, hogy az amorf geometriájú légszűrőház alsó részéhez csatlakozó beömlő csőcsomponkon más típusú és (feltehetően) jobb minőségű hálót tudjak majd létrehozni. Mindenekelőtt lefagyasztottam (Freeze) a teljes geometriát, majd egy sík definiálásával létrehoztam a kívánt részeket. Ezek után kiegészítettem a már lemodellezett geometriát a csőcsomok beömlő keresztmetszetén, amin egy $r_{f,gb} = 0,075 [m]$ sugarú félgömböt hoztam létre. Erre azért volt szükség, hogy a szimuláció peremfeltételi során megadott beömlő (inlet) peremfeltételben definiált mennyiség áramvonalai, ennek a félgömbnek a palástjáról induljanak. Ezzel az volt a célom, hogy így modellezem a szabad térből beszívott levegőt. Majd ezután az összes létrejött térfogat elemet egy alkatrész csoportba rendeztem össze, mivel a szoftver csak így érzékeli az egyes részeket elválasztó felületet belső felületként. Ez elengedhetetlen volt a későbbiekben a légszűrő szűrő felületeként definiált porózus zóna modelljének létrehozásában, mivel az csak az áramló közeg belső részében értelmezett. Az így létrejött végleges geometriájú légszűrőrendszert az **5.4 ábra** hivatott szemléltetni.



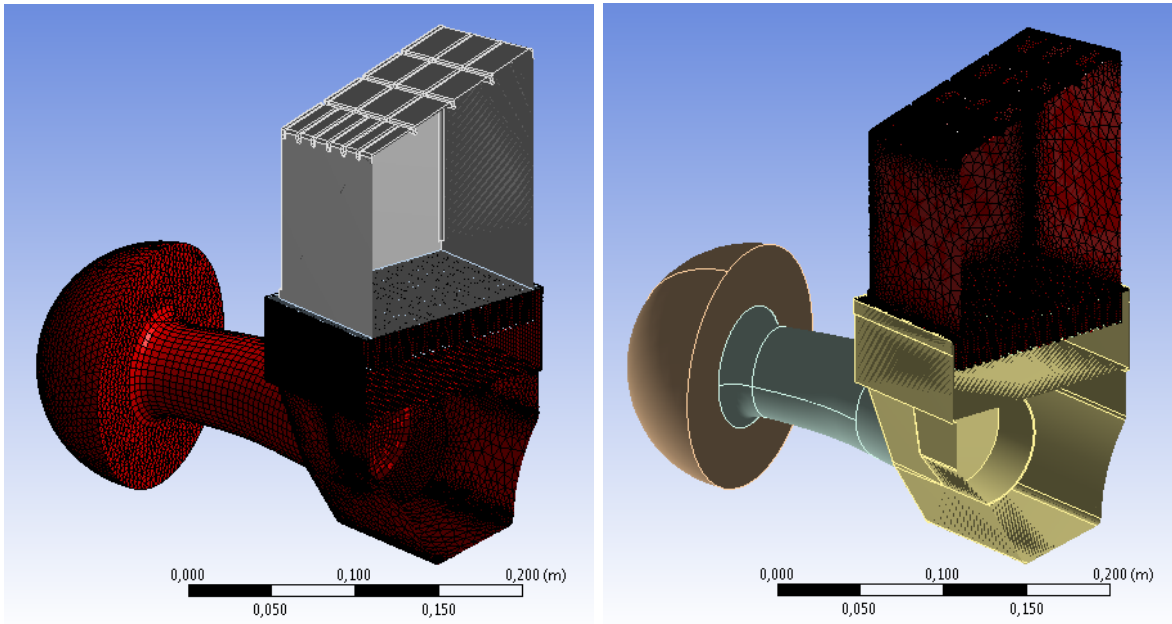
5.4 ábra: A légszűrőrendszer teljes térfogati modellje FLUENT-ben

5.3 A véges térfogatú modell hálójának létrehozása

A létrehozott térfogati elemek hálózása előtt a későbbi numerikus szimuláció peremfeltételeihez az úgy nevezett *Named Section*-ök definiálása. Ezek olyan felületi, vagy térfogati elemek, melyekre a későbbiekben már könnyen megadhatóak az egyes peremfeltételek. Ezek egy részét az **5.5 és az 5.6 ábra** szemlélteti, illetve az egyes részek elnevezését az **5.2 táblázatban** foglaltam össze. Ebben a táblázatban az egyes részek megnevezése és helye mellett, kitértem külön azoknak jelentőségére a későbbiekben megadott peremfeltételek szempontjából.



5.5 ábra: A légszűrőrendszeren átáramló levegő, be- és kilépő felülete



5.6 ábra: A rendszerben áramló levegő két térfogati része; balra: air1, jobbra air2

5.2 táblázat: Az egyes felületi és térfogati elemek elnevezése, helye a modellen és szerepe

Neve	Helye	Szerepe
velocity inlet	A félgömb külső, domború felülete	a levegő beáramlásának biztosítása
pressure outlet	a légszűrőház felső részének kiáramló felülete	a rendszerből történő kiáramlás biztosítása
air1	a légszűrő előtti levegő térfogati elemeinek összessége	lehetővé teszi a légszűrő előtt és utáni részek külön-külön történő megvizsgálását
air2	a légszűrő utáni levegő térfogati elemeinek összessége	
filter	a légszűrő szűrőfelületei	a szűrő porózus felületei, amin az áramlás áthaladhat
surface1	a légszűrőház alsó felének felső felülete	a felületen keresztül történő zavartalan áramlás
surface2	a légszűrőház felső felének alsó felülete	
wall1	a félgömb egyenes felülete	a környezetből beszívott levegő ezen a felületen nem léphet a rendszerbe
wall2	a légszűrő oldalfalai	a szűrő olyan felületei, melyeken az áramlás nem haladhat keresztül

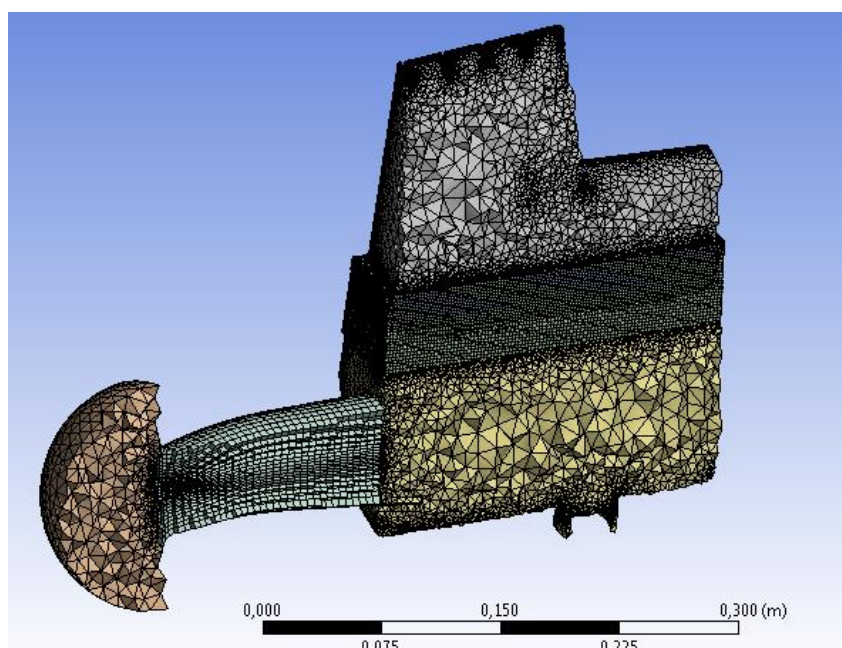
5.3.1 Az egyes térfogati elemek hálózása

Az egyes térfogati elemekre, illetve bizonyos felületekre a háló minőségének érdekében különböző típusú és elemméretű hálót definiáltam. Az egyes részek elemméreteit csak a későbbiekben részletezem az **5.3.2 fejezetben**, a hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzése során. Az egyes részekre kialakított háló típusait viszont ennek során már nem változtattam meg, mivel az egyes részek geometriai adottságai miatt nem engedtek túl sok választási lehetőséget. A továbbiakban az egyes részek megnevezése a **4.2 fejezetben** leírt rövidítések alapján történik.

5.3 táblázat: Az egyes térfogati elemekre definiált hálózási módszerek

Háló típusa	Térfogati elem megnevezése
Automatic Method	FGB: félgömb térfogata
Sweep Method, User defined source and target surface, All Quad	BCS: beömlő csőcsonk térfogata
Patch Conformed mesh	LHA és LHF: légszűrőház alsó és felső felének térfogata
Hexa Dominated Method, All Quad	LSZA és LSZF: légszűrő alsó és felső fele
Face Sizing	LHA (beömlő csőcsonk pereménél), LSZA (belépő, alsó felületénél), LSZF (az egyes szűrőlamellák tetején), LHF (belépő alsó pereménél)

Azokon a részek ahol lehetett (pl.: légszűrő, beömlő csőcsonk, félgömb) igyekeztem strukturált hálót kialakítani. Azonban a légszűrőház alsó és felső felének amorf geometriája csak tetra háló kialakítását tette lehetővé. Az egyes hálótípusok a teljes geometriára, illetve külön a légszűrő, az **5.7 ábrán** jól megfigyelhető, amennyiben a teljes térfogati geometriát egy adott irányba definiált metszősíkkal elmeteszem.



5.7 ábra: A légszűrőrendszer metszeti képe a különböző hálózási módszerek megjelenítésével

Jól láthatóak az **5.7 ábrán** a különböző metódusú hálók szerkezete. Továbbá az is kivehető, hogy az olyan felületeken, vagy zónákban ahol két eltérő szerkezetű háló találkozik, nagyméretű cellaméretbeli különbségek keletkeznek. Ezen különbségeket az egyes átmeneti felületre definiált átmeneti elemméret szabályozásokkal (Face sizing) igyekeztem csökkenteni. Erre azért volt szükség, mert kis térfogati részen a nagy elemméret ugrások jelentős numerikus hibához vezetnének. Azonban mind ezek alapján még nem jelenthető ki, hogy az elkészített véges térfogatú modell hálózása jó lenne. Ehhez a továbbiakban részletezett hálófüggetlenségi vizsgálatra is szükség van.

A háló készítése során az így létrejött 3 különböző gyártmányú légszűrő véges térfogatú modelljei között többszörös elemszámbeli különbség mutatkozott. Ez a Bosch és Mann Filter gyártmányú szűrők esetén közel 4-5 millió elemszámnak, a K&N gyártmányúnál pedig csak 1 millió elemszámnak adódott. Ezek pontos elemszámát az egyes légszűrőkre, és az egyes térfogati zónákra levetítve az **5.4 táblázat** tartalmazza. A Bosch és Mann Filter gyártmányú légszűrők lamelláinak száma jóval nagyobb, illetve ebből kifolyólag sűrűbben is helyezkednek el, így ezeken a tartományokon nagyon sűrű és kis elemszámú hálót kellett létrehozni. Ez sajnos azt jelentette, hogy a rendelkezésemre álló erőforrások miatt, pusztán csak a K&N gyártmányú légszűrőt tartalmazó rendszer áramlási szimulációját tudtam lefuttatni.

5.4 táblázat: Az egyes térfogati elemek elemszáma, az egyes légszűrőket tartalmazó rendszerek esetén

	<i>FGB</i>	<i>BCS</i>	<i>LHA</i>	<i>LHF</i>	<i>LSZA</i>	<i>LSZF</i>	<i>Összesen</i>
<i>Bosch</i>	16729	7854	2233245	932738	710345	1089195	4990106
<i>Mann Filter</i>	10714	1880	1590878	754755	672112	965524	3995863
<i>K&N</i>	20700	13182	355793	564336	62825	21550	1038386

Ettől függetlenül létrehoztam és beállítottam a másik két gyártmányú szűrő esetén is az egyes beállításokat és paramétereket, megalkotva ezzel a teljes véges térfogatú modelljüket. Ezek futtatását viszont az említett okok miatt már nem tudtam elvégezni, többek között azért sem, mert az egyes modellek hálófüggetlenségi vizsgálata még további hálósűrítést igényelt volna, mely így még magasabb elemszámú modellt eredményezett volna. Ezen légszűrőket tartalmazó rendszerek modelljeit természetesen, az egyéb beadandó dokumentumok, illetve a továbbiakban vizsgált K&N gyártmányú légszűrőt tartalmazó rendszer szimulációja a szakdolgozatomhoz mellékelt DVD-n megtalálható.

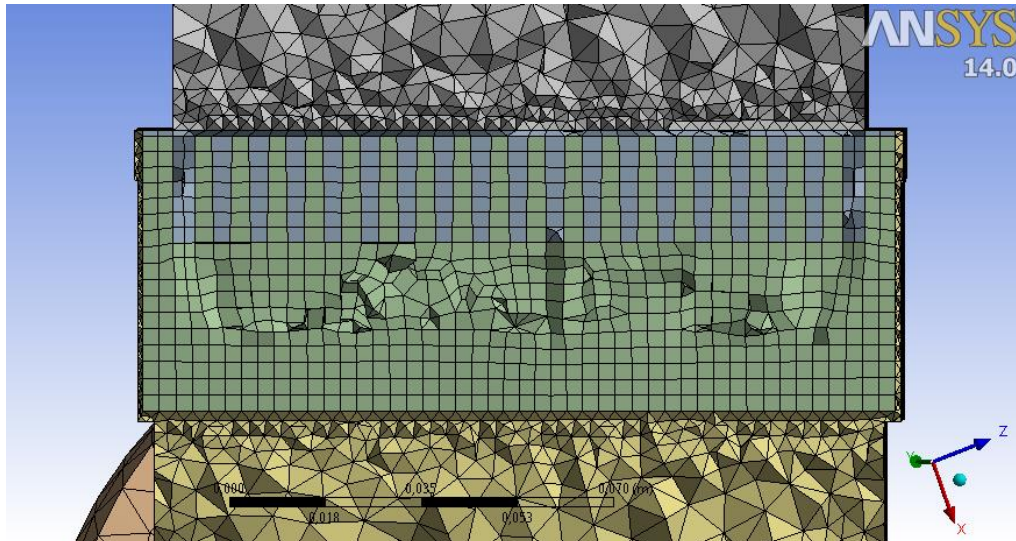
5.3.2 Hálófüggetlenségi vizsgálat

Az említett okok miatt a továbbiakban tehát csak a K&N gyártmányú légszűrőt tartalmazó rendszert vizsgáltam. A már létrehozott háló önmagában, bár már alkalmas volna arra, hogy futtatható legyen a szimuláció, azonban meg kellett még vizsgálnom a létrehozott hálón lefuttatott szimulációk függetlenségét, vagyis hogy azok végeredményei között mekkora eltérések adódnak. Ezt úgy végeztem el, hogy az eredetileg létrehozott hálót, két lépcsőben sűrítettem, ezáltal magasabb elemszámú és feltehetően pontosabb hálót kaptam. Az így létrejött véges térfogatú modellek (*kundn_1*, *kundn_2* és *kundn_3*), egyes térfogati részekre levetített elemszámát az **5.5 táblázatban** foglaltam össze a K&N gyártmányú légszűrőt tartalmazó rendszer esetén.

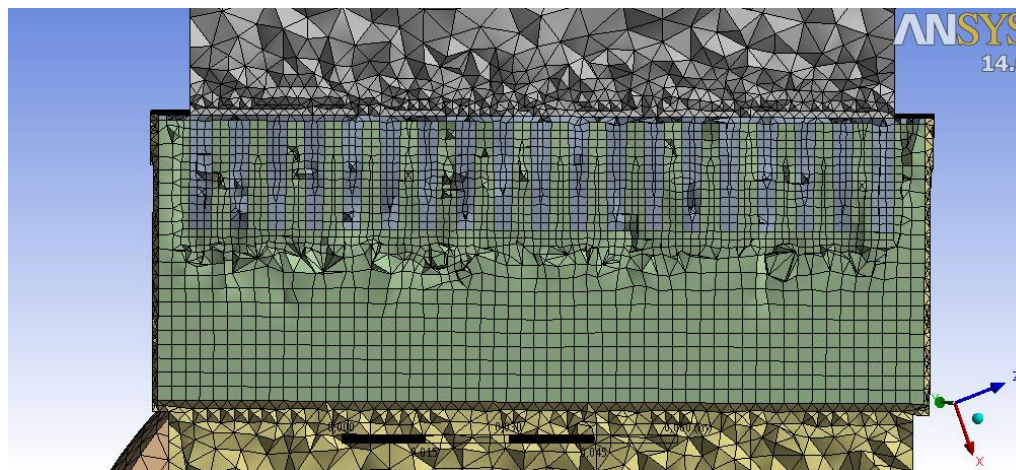
5.5 táblázat: Az egyes térfogati elemek elemszáma a vizsgált modellverziók esetén

modellverzió	FGB	BCS	LHA	LHF	LSZA	LSZF	Összesen
<i>kundn_1</i>	20700	13182	355793	564336	62825	21550	1038386
<i>kundn_2</i>	24512	18360	517394	842662	172355	71788	1647071
<i>kundn_3</i>	73169	18360	538546	852882	310843	185061	1978861

A hálósűrítésének mértékét az egyes modellverziók (*kundn_1* és *kundn_3*) metszeti képe hivatott ábrázolni az **5.8** és **5.9 ábrán**.



5.8 ábra: A *kundn_1* modellverziójú K&N légszűrőt tartalmazó rendszer metszeti képe



5.9 ábra: A *kundn_3* modellverziójú K&N légszűrőt tartalmazó rendszer metszeti képe

A fenti ábrákon jól megfigyelhető az egyes zónák elemméretének változása a háló sűrítésének mértékében. Megfigyelhető továbbá az is, hogy az egyes légszűrők lamelláit az *kundn_1* esetben csupán egy sor, míg a későbbiekben (*kundn_2*, *kundn_3*) már több sornyi elem alkotja. Erre azért volt szükség, mert így nagymértékben kiküszöbölhetőek az itt számított értékek numerikus hibái, ami abból adódik, hogy a lamella felületekre definiált peremfeltételek és a lamella geometriai kialakítása miatt egy fajta részáramlás alakul ki. Ebben az esetben több cellasor alkalmazása ajánlott, az esetleges hibák elkerülésének érdekében [14]. Mindezen korrekciók mellett megvizsgáltam a háló minőségét is a *Skewness* opció segítségével, melynek során törekednem kellett arra, hogy ez a százalékos

mennyiség tetra elemek esetén 95% és hexa elemek esetén 85% fölé ne mehessen [14], mert ezáltal olyan elnyújtott cellák jönnének létre melyek komoly numerikus hibákhoz vezethettek volna. Ahol tehát szükséges volt ott lokális elemméret beállításokkal (*Face Sizing*) igyekeztem ezen határértékek alatt tartani a hálót alkotó különböző típusú elemeket.

Az egyes futtatások során a későbbiekben (**5.4 fejezet**) részletezett beállításokat használtam, illetve az alábbi paramétereket adtam meg:

- Velocity Magnitude: $2,8723 \left[\frac{m}{s} \right]$
- Face Permeability: $3,9102 \cdot 10^{-9} [m^2]$
- Porous Medium Thickness: $0,002 [m]$

Ezen értékek közül a beáramló levegő sebességét, a mérés során a 4. mérési pontban mért nyomáseséséből számítottam ki, az **5.4 fejezetben** részletezettek alapján. Ezekkel a beállításokkal lefuttatva a 3 különböző modellverziót az **5.6 táblázatban** összefoglalt eredményeket kaptam.

5.6 táblázat: Az egyes modellverziókkal futtatott véges térfogatú szimulációk eredményei

	<i>elemszám</i>	Δp_f [Pa]	v_{ki} [m/s]
<i>kundn_1</i>	1038386	96,0423	43,1722
<i>kundn_2</i>	1647071	56,9125	46,0535
<i>kundn_3</i>	1978861	52,7525	46,8011

Jól látható, hogy a *kundn_1* és *kundn_2* modellverziók azonos bemeneti peremfeltételek esetén, mind a szűrőn eső Δp_f nyomásesés, mind a rendszert elhagyó levegő v_{ki} sebessége között, jelentős eltérés figyelhető meg. A két modellverzió közötti elemszám növekedés jelentős, mint ahogy az eredmények közti különbség is. Ugyanakkor a *kundn_2* és *kundn_3* hálók esetén a kapott eredmények közti különbség már jóval kisebb (Δp_f esetén 7,3%, v_{ki} esetén pedig alig 1,6%). Mindezek alapján elmondható, hogy a *kundn_3* modellverzió lefuttatott számítások végeredménye közelítőleg hálófüggetlen és pontos. Természetesen lehetett volna még tovább sűríteni, azonban jelentős pontosságbeli növekedés így nem történt volna, viszont a szimulációk számítási igénye nagymértékben nőtt volna. Így tehát a további számításokat és a végleges véges térfogatú szimulációkat a *kundn_3* modellverzió hálóján végeztem el.

5.4 A numerikus szimuláció beállításai és peremfeltételei

A véges térfogatú modell létrejötte után a FLUENT beépülő modul segítségével beállítottam az áramlástan szimuláció egyes beállításait, paramétereit, illetve peremfeltételeit. Az így definiált általános beállításokat az alábbi felsorolásban részletezem:

- General:
 - Type: Pressure-based
 - Velocity formulation: Absolute
 - Time: Steady
- Solution controls: Default
- Reference Values: Default
- Models: Viscous model: $k - \omega$, SST (default parameters)
- Solution Methods:
 - Pressure-velocity coupling, Scheme: SIMPLE
 - Spatial discretizations:
 - Gradient: Least squares cell based
 - Pressure: Standard
 - Momentum: Second order upwinding
 - Turbulent kinetic energy: Second order upwinding
 - Specific dissipation rate: Second order upwinding.

Mindezen beállítások mellett szükséges volt megadni a rendszerre vonatkozó további peremfeltételeket (*Boundary Conditions*). Ezeket a peremfeltételeket a már korábban definiált (**5.3 fejezet**) egyes felületi és térfogati elemekre adtam meg.

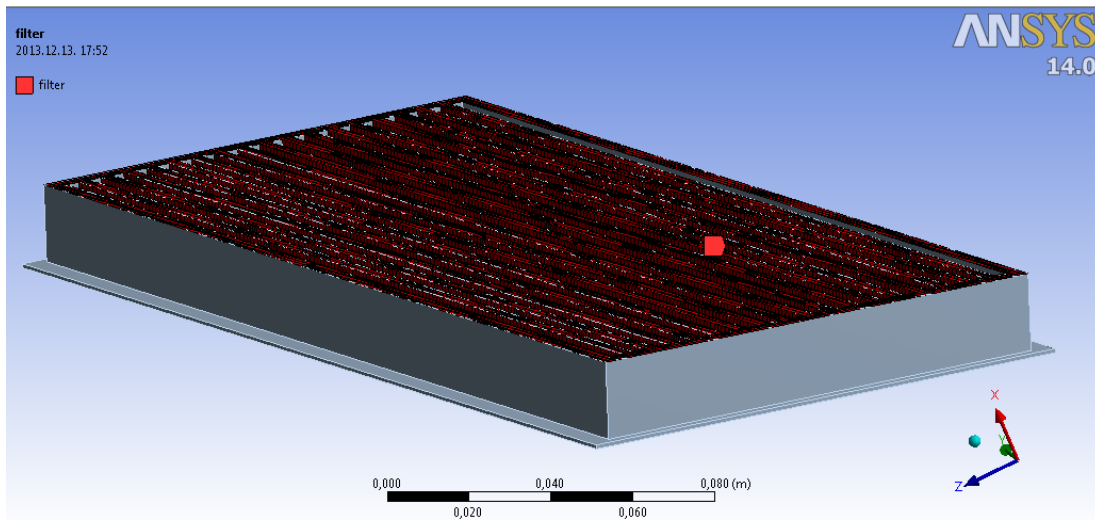
velocity inlet: a légszűrőrendszerbe beáramló levegő sebességének megadása (a mért térfogatáramból számított, adott keresztmetszeten érvényes átlagsebesség)

- Velocity Magnitude: [m/s]
- Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary
- Turbulence: Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter:
 - Turbulent Intensity: 1 [%]
 - Hydraulic Diameter: 0,001 [m]

pressure outlet: a rendszerből kiáramló levegő kilépő nyomásának peremfeltételét adja meg, de mivel ezt esetünkben nem mértem, ezért ennek nem adtam meg értéket (program inicializálja majd a futtatás során). Ennek a peremfeltételnek a definiálására csak azért szükséges, hogy a vizsgált rendszer rendelkezzen a konkrét értéket definiáló belépő peremfeltétel mellett kilépővel is.

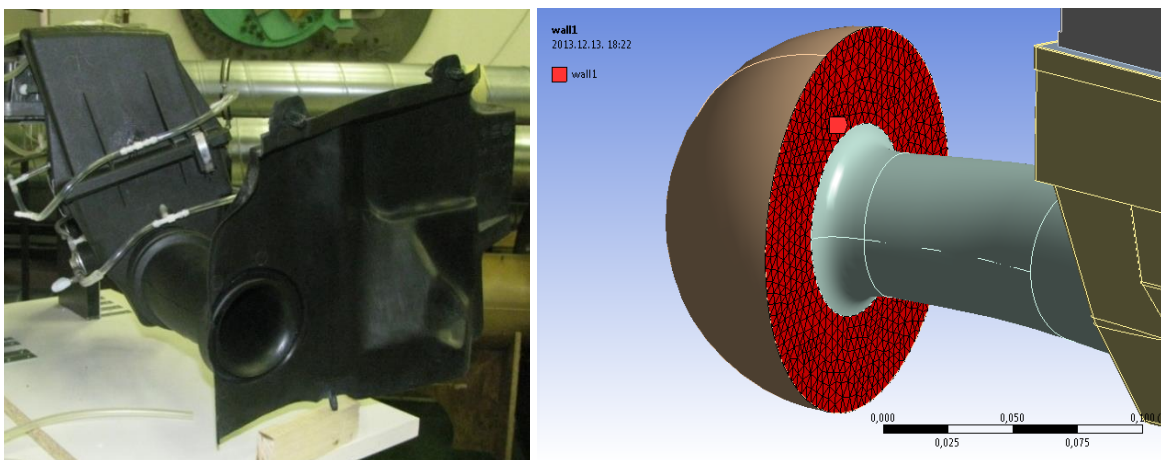
filter: *porous-jump* – a légszűrő szűrőfelületeként értelmezett adott vastagságban definiálható porózus zóna.

- Face Permeability: a porózus zóna permeabilitása [m^2]
- Porous Medium Thickness: a zóna vastagsága a felületre normális irányban [m]
- Pressure-Jump Coefficient (C_2): ami esetünkben minden légszűrő esetén 0



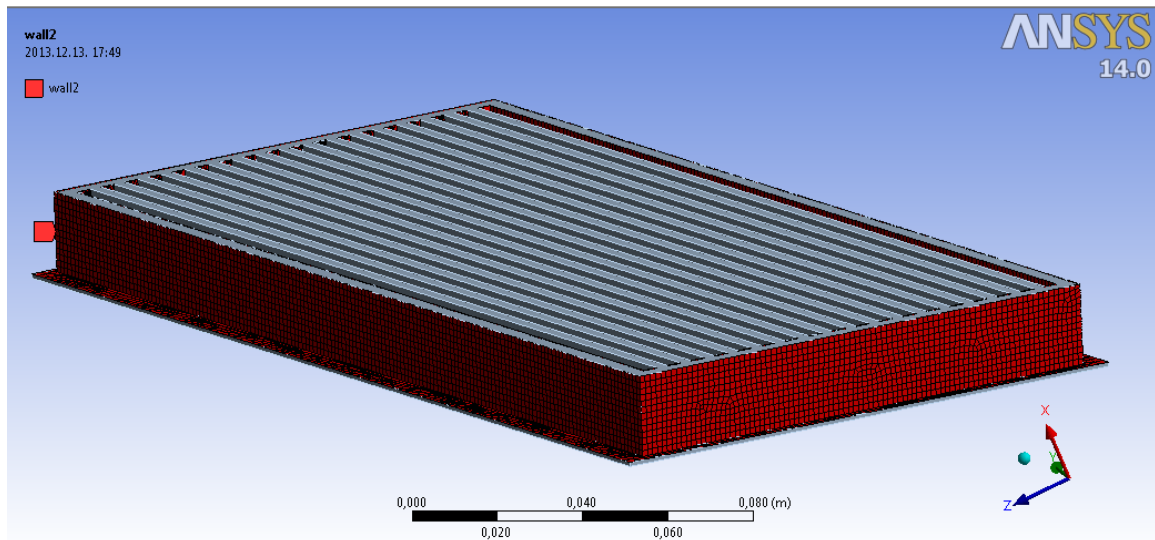
5.10 ábra: A légszűrő felületén definiált porózus réteg peremfeltétel (*porous-jump*)

wall1: *wall* – ez a peremfeltétel azt hivatott biztosítani, hogy a félgömb térfogatú légtérből a rendszerbe beszívott levegő, a térrész hátsó, sík lapján keresztül ne, és ez által csak a külső, domború felületéről érkezzon a rendszerbe. Erre azért van szükség, mivel a valóságban ezen részen egy műanyag lap van, aminek az a szerepe, hogy a motortérből a rendszer ne szívjon be meleg levegőt. Ennek kialakítását a modellben, illetve a valóságban az **5.11 ábra** szemlélteti.



5.11 ábra: A beömlő csonc előtti félgömb térfogatú elem hátsó falára megadott peremfeltétel (*wall1*)

wall2: *wall* – ennek az a szerepe, hogy a légszűr felső térfogatú részén annak az oldalfalain ne történjen kiáramlás, mivel az a valóságban is gátolt a lamellákat összefogó gumiköpeny által. Ezt a kialakítás jól megfigyelhető az **5.12 ábrán**.



5.12 ábra: A légszűrő gumiköpenyére definiált peremfeltétel (*wall2*)

Interior1: *interior* – a légszűrőház alsó felének kilépő felületére megadott peremfeltétel, amely biztosítja a szabad akadálymentes rááramlást a légszűrőre.

Interior2: *interior* – az előzőhöz hasonlóan itt is az akadálymentes áramlás biztosítása a cél, ez esetben viszont a légszűrő ház felső részére felső térfogati elemének a felületéről.

A fentiekben kiemelt be- és kilépési peremfeltételek megadása során nem csak az említett feltételek kombinációját, hanem ezek mellett sok mást is kipróbáltam. Elsőként *mass flow inlet* (belépő tömegáram) és *outflow* (kiáramlás) peremfeltételeket adtam meg. Ehhez szükséges volt meghatározni a rendszerbe belépő levegő térfogatáramát, illetve annak irányát. Ennek nagyságát az 1.32 összefüggés alapján tudtam meghatározni, ahol a levegő q_v térfogatárama és ρ_{lev} sűrűsége a mérés kiértékeléséből adódott. A kiáramlás mértékét, a már említett *pressure outlet* peremfeltételhez hasonlóan, itt sem definiáltam külön. Ennek az volt az oka, hogy *outflow* peremfeltétel alkalmazása esetén csak a térfogatáram arány (megoszlása) írható elő. Amennyiben a modell csak egyetlen ilyen peremfeltételt tartalmaz (mint jelen esetben is), akkor a megadott értéket a megoldó nem veszi figyelembe [14]. Azonban ezzel a beállítással futtatott számítások, 1000 iteráció után sem konvergáltak.

$$\dot{m} = q_v \cdot \rho_{lev} \quad (1.32)$$

Majd következő lépésben *velocity inlet* és *outflow* peremfeltételeket definiáltam, azonban ez a megoldás divergensnek adódott. Ennek feltehetően az volt az oka, hogy ezt a peremfeltétel kombinációt csak összenyomhatatlan közegek esetén lehet alkalmazni [14]. Ezt követően már a fentiekben részletezett be- és kilépő peremfeltételeket állítottam be (*velocity inlet*, *pressure outlet*), amivel viszont már a számítás már konvergens volt. Így a többi számítás során is ezt a peremfeltétel kombinációt használtam. Az így beállított belépő levegő sebességét az 1.33 és 1.34 szerint tudtam meghatározni.

$$v_{fgb} = \frac{q_v}{A_{fgb}} \quad (1.33)$$

$$A_{fgb} = \frac{4r_{fgb}^2\pi}{2} \quad (1.34)$$

Ezek alapján tehát már minden egyes mérési pont esetén meghatározható a félgömb térfogati elem palástján belépő levegő sebességének a nagysága (*Velocity Magnitude*). Ezen értékeket az egyes vizsgált mérési pontokban az **5.7 táblázat** tartalmazza.

5.7 táblázat: Az egyes mérési pontokra meghatározott sebessége a félgömb felületén beáramló levegőnek

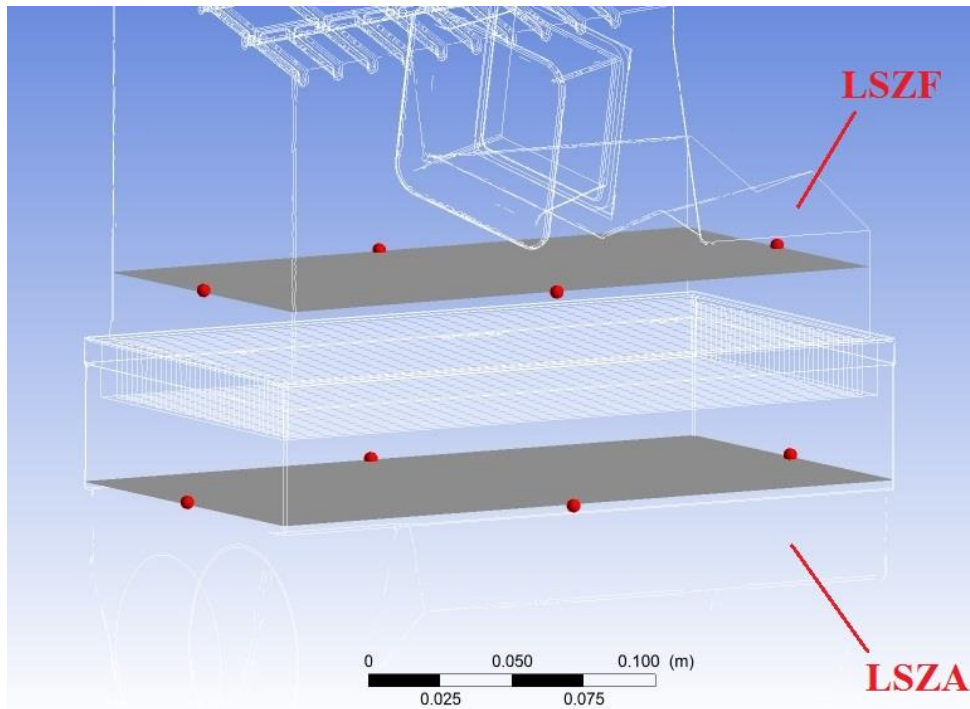
Mérési pont	Δp_f	q_v [m ³ /s]	v_{fgb} [m/s]	v_{ki} [m/s]
4.	4,67	0,1015	2,8723	40,5070
1.	6,26	0,1169	3,3072	46,6539

Minden egyes modellverzió esetén a véges térfogatú szimulációkat a futtatás előtt inicializáltam, majd ezt követően 1000 iterációt beállítva lefutattam, amelyek során az egyes modellverziók esetén a számítások már konvergensenek voltak tekinthetőek.

5.5 Futtatás és kiértékelés

Az eredmények kiértékeléséhez a valóságos légszűrő rendszer nyomásmegcsapolási furataival azonos helyen vizsgáltam a véges térfogatú modellen adódó nyomásesést. Mint ahogy azt a mérőberendezés kialakításának leírása során (**2.1 fejezet**) is kifejtettem, a légszűrőház alsó és felső felén 4-4 nyomásmegcsapolási pont található. Ezen pontok helyét a laboratóriumi mérőrendszeren megmérve arra a következtetésre jutottam, hogy a mérési pontok az egyes feleken jó közelítéssel egy-egy síkon helyezkednek el. Ezeket a mért távolságok alapján a véges térfogatú modellben is definiáltam. Ezen két síkon megjelenítve a nyomáseloszlásokat, illetve a valóságos kialakításnak megfelelő 4-4 pont nyomásértékeinek átlagából már meghatározható volt a légszűrő előtt és után adódó nyomásesés. Ezen síkok és az azokon elhelyezkedő mérési pontok elrendezését az **5.13 ábra** szemlélteti.

Az általam vizsgált légszűrő esetén csak 2 mérési pontban meghatározott térfogatáramnak megfelelő beáramlási sebesség esetére hoztam létre az egyes numerikus szimulációkat. Erre elsősorban a hálózás során létrejött nagy elemszámú modellek magas számítási időigénye miatt kényszerültem. Mindemellett fontos kiemelni azt is, hogy az egyes véges térfogatú modellek bemenő adatai közül, a megadott peremfeltételekből csak a beáramlási sebesség értékét kell megváltoztatni, ahhoz az adott légszűrő modelljével vizsgált rendszer egy másik pontjára is lefuttathassam a kívánt véges térfogatú szimulációt.



5.13 ábra: A légszűrő előtti és utáni síkok, illetve az azokon elhelyezkedő mérési pontok elrendezése

A BMW 318is motorjának alapjáratú levegőigénye: $12,5 \left[\frac{l}{s} \right]$. Az általam kijelölt mérési pont mindhárom légszűrő esetén az autó motorjának alapjáratához tartozó érték 8-szorosának közelében, vagyis $q_v \cong 0,1 \left[\frac{m^3}{s} \right]$ (a 4-es mérési pontban) körüli értéket választottam. Ennek az volt az oka, hogy a kis térfogatáram mellett mért nyomásesési értékek között csak viszonylag kis különbségek figyelhetőek meg.

Az egyes szimulációk során használt, az **5.1 fejezetben** meghatározott és a későbbiekben a porous-jump peremfeltétel paramétereként megadott α permeabilitási tényező nagysága csak közelítőleg helyes, ezért a szimulációk futtatása során ennek értékét iterálással addig változtattam, míg a légszűrőn mért nyomásesési értékeket ($\Delta p_{f, mért}$), a szimulációk eredményeként kiadódó nyomáskülönbségek ($\Delta p_{f, FVM}$) értékei mind jobban meg nem közelítették. Ezek pontos értékeit az egyes iterációs lépésekre az **5.8 táblázat** foglalja össze.

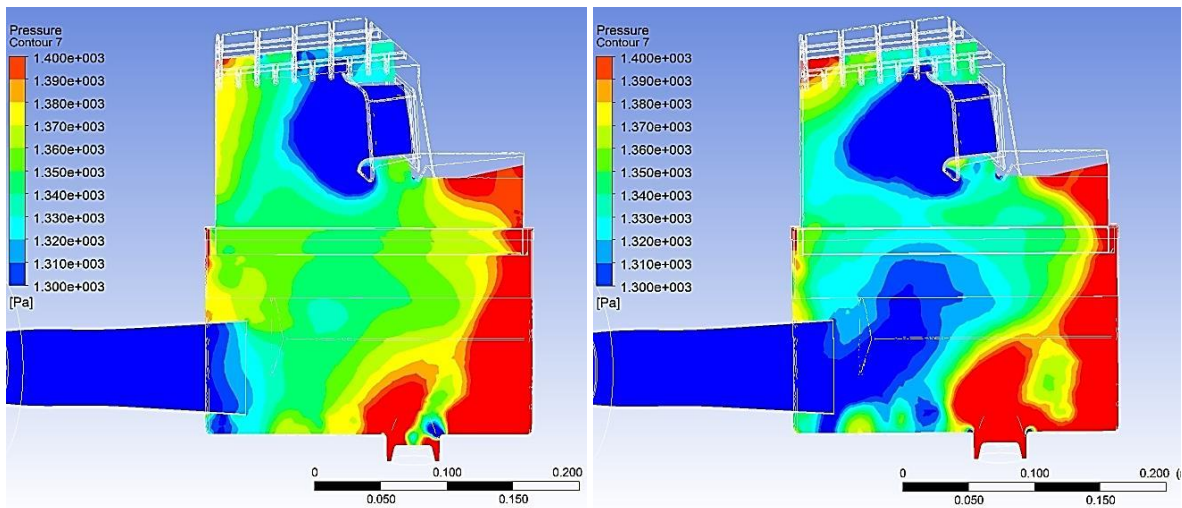
5.8 táblázat: Az egyes nyomásértékek, illetve azok különbségei az α permeabilitással való közelítésből

modellverzió	α [m^2]	v_{fgb} [m/s]	p_{LSZA} [Pa]	p_{LSZF} [Pa]	$\Delta p_{f, FVM}$ [Pa]	$\Delta p_{f, mért}$ [Pa]	eltérés [%]
kundn_3	3,9E-09	2,8723	1407,12	1354,37	52,75	4,67	1030%
kundn_3.1	3,9E-08		1507,44	1471,48	35,96		670%
kundn_3.2	3,9E-06		1542,17	1521,08	21,10		352%
kundn_3.3	3,0E-03		1389,18	1381,77	7,40		59%
kundn_3.4	9,1E-03		1372,34	1367,52	4,82		3%
kundn_3.5	9,1E-03	3,3072	1863,01	1856,35	6,66	6,26	6%

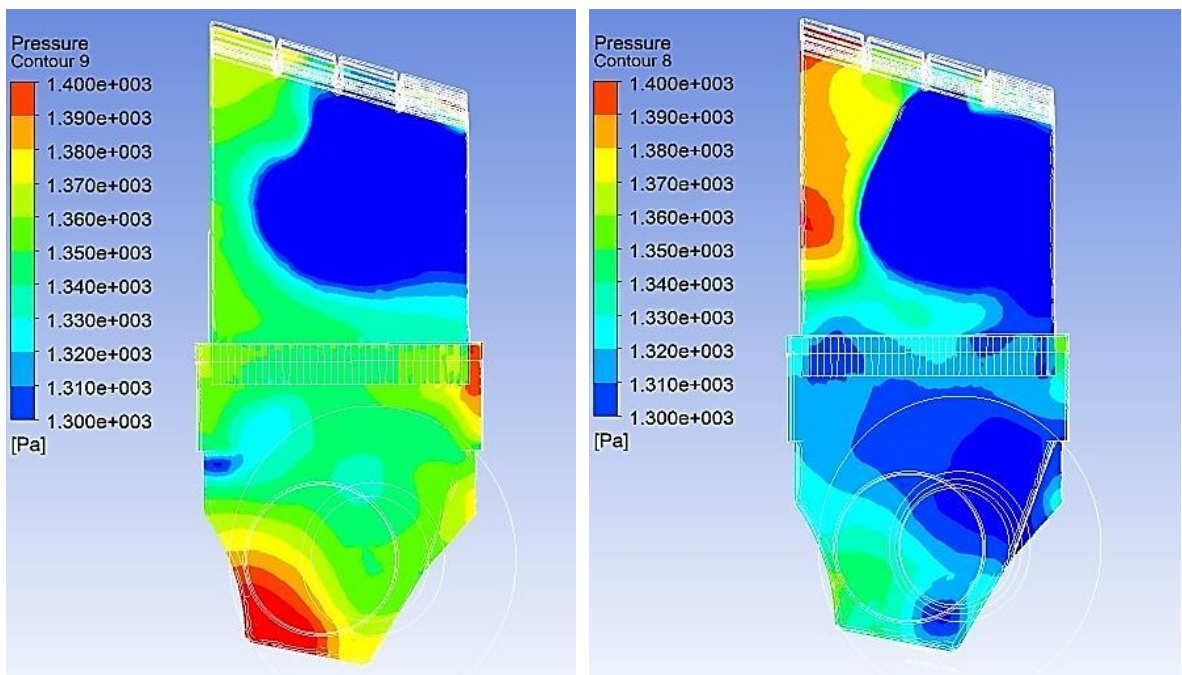
A fenti táblázatból jól látszik, hogy a 4. közelítéssel már viszonylag kis hibával meghatározható egy adott beáramlási sebesség mellett, a szűrőre jellemző α permeabilitási tényező értéke. Ezt a mérés során mért, és a szimulációval meghatározott a légszűrő előtti

és utáni származó nyomásesések közötti eltérés mértékéből tudtam eldönteni. Ezen kívül az így meghatározott permeabilitási tényező ellenőrzéseként egy másik (I.) mérési pontban is megvizsgáltam a légszűrőre eső nyomásesést, illetve összehasonlítottam azt a mérés során meghatározott értékkel. Ebben a mérési pontban a légszűrőrendszeren átáramló levegő térfogatárama a fűvóval létrehozható legnagyobb volt, illetve a légszűrőn adódó legnagyobb nyomásesés is. Ez alapján kijelenthető, hogy a meghatározott permeabilitási tényező jól jellemzi a K&N gyártmányú légszűrő véges térfogatú modelljének szűrőfelületét.

A légszűrőrendszer hosszmetsetén ábrázolva a nyomáseloszlást (5.14 ábra) megfigyelhető, hogy míg a kis permeabilitással (nagy viszkozus ellenállású) modellezett légszűrőn keletkező nyomásesés, addig a nagyobb permeabilitású légszűrő esetén szinte alig tapasztalható nyomásesés. Ez jól látszik abból, hogy a baloldali ábrán a nyomásnagyságokat szimbolizáló kontúrvonalak a légszűrőn keresztülhaladva erős törést mutatnak, ami viszont a jobb oldalon már alig figyelhető meg.



5.14 ábra: A légszűrő hosszmetsetén ábrázolt nyomáseloszlás; balra: *kundn_3* jobbra: *kundn_3.4*



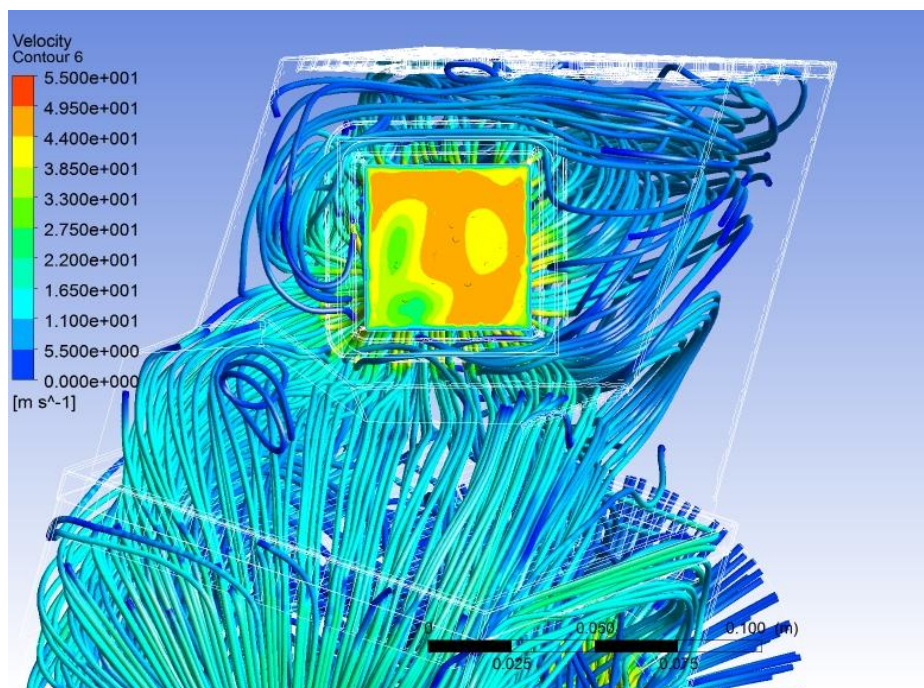
5.15 ábra: A légszűrő keresztmetsetén ábrázolt nyomáseloszlás; balra: *kundn_3* jobbra: *kundn_3.4*

A már említett nyomáseloszlási tartományok határát szimbolizáló kontúrvonalak törési, illetve az egyes nyomáskülönbségek a hosszmetzeti képnél jobban megfigyelhetőek légszűrőrendszer keresztmetzeti képén, amik az **5.15 ábrán** látszanak.

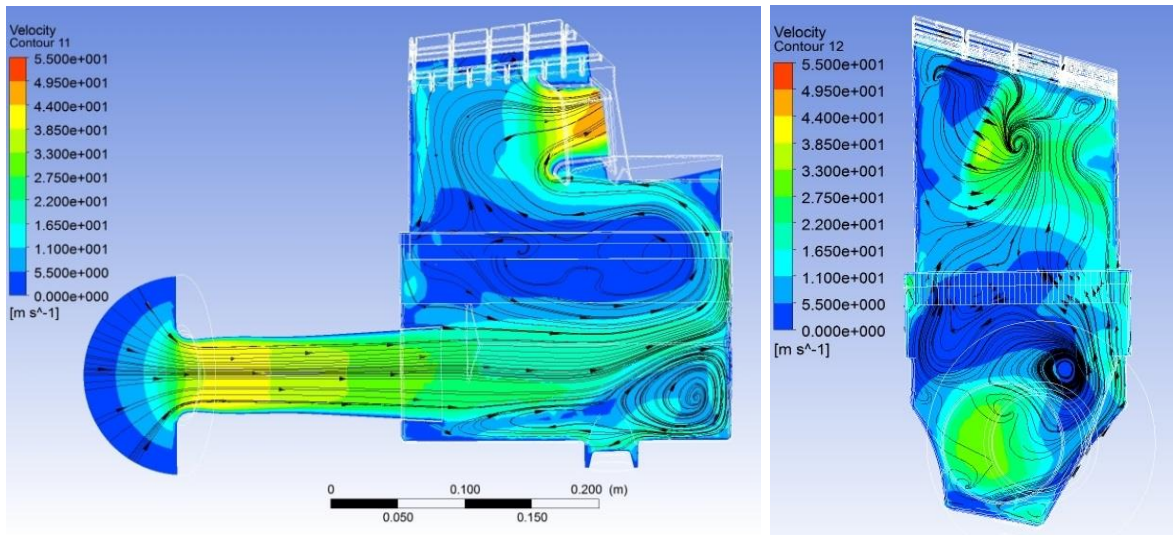
Emellett úgy gondoltam érdemes megvizsgálni a rendszerben áramló levegő sebességeinek nagyságát is, a légszűrőház felső felének kilépési felületén. Ennek értéke analitikus úton is meghatározható a már kiszámolt térfogatáramból az **5.4 fejezetben** említett módhoz nagyon hasonlóan (1.35). Ehhez szükséges a kilépő felület nagysága is, amelyet a Pro Engineer-ben létrehozott modellből lemérve $A_{ki} = 0,002499 [m^2]$ -nek adódott.

$$v_{ki} = \frac{A_{ki}}{q_v} \quad (1.35)$$

Így az 1.35 összefüggés értelmében a vizsgált (4.) mérési pontra a kiáramló levegő sebessége $v_{ki_mért} = 40,51 \left[\frac{m}{s}\right]$. Ezt összehasonlítva a szimulációban a kilépő felületre megjelenített sebesség értékek átlagával (*Area-Weighted Average Velocity*), ami a *kundn_3.4* modellverzió esetén $v_{ki_VTM} = 42,05 \left[\frac{m}{s}\right]$. Jól láthatóan ez a különbség minimális (3,67 %), tehát ebből a szempontból is kijelenthető, hogy a K&N gyártmányú légszűrővel modellezett légszűrőrendszer véges térfogatú szimulációja jól közelíti a valóságos mérés során tapasztaltakat. A légszűrőház felső részén a kiáramló sebesség eloszlását az adott keresztmetszetre az **5.16 ábra** szemlélteti. Emellett jól szemlélteti a átáramló levegő sebességének eloszlását és irányát a légszűrőrendszer hossz és keresztmetzetén az **5.17 ábra**.

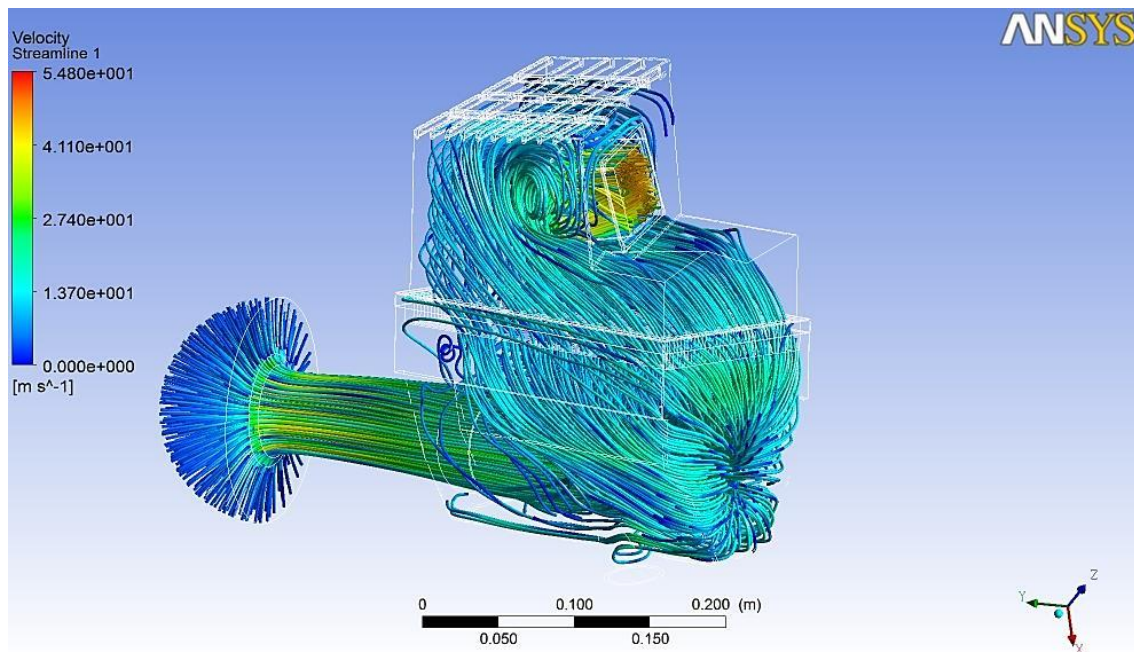


5.16 ábra: A légszűrőrendszerből kilép levegő sebességeloszlása a kiáramló keresztmetszeten



5.17 ábra: A levegő sebességeloszlása és iránya a légszűrőrendszer hossz- és keresztmetszetén

Az eddigiek mellett ábrázoltam az **5.18 ábrán** a légszűrőn keresztül áramló levegő áramvonalait is. Ezen jól megfigyelhetők a rendszernek azon részei is, amelyekről a mérés során nem kaptam információt. Ilyen pl. a beáramló levegő felütközése, a légszűrőház alsó részének hátlapján. Jól látható módon itt az áramló közeg nagymértékben irányváltásra kényszerül, melynek következtében feltételezhető, hogy már itt megtörténik a porrészecskék kiválása a levegőből, az **1.3 fejezetben** megemlített porleválasztóháttal kapcsolatos hatások (porszemcsék tehetetlenségének) következtében. Ez természetesen csak feltételezés, mivel a porleválasztás mérése a szakdolgozatom során nem történt meg, tehát nem is bizonyítható. Az viszont jól látható, hogy a légszűrőn keresztülhaladó levegő irányváltásra kényszerül. Azonban ez a hatás feltehetően a vizsgált K&N gyártmányú légszűrőnél kisebb, mint az összes többi vizsgált légszűrőnél, mivel a szűrő lamellák sűrűsége itt jóval kisebb, amiből következően a levegő irányváltása is. Emellett a szűrő lamellái nincsenek élre hajtva, így ezeken a felületeken is átáramolhat a levegő.



5.18 ábra: A légszűrő rendszeren átáramló levegő áramvonalai

Összefoglalás

A szakdolgozatom során megvizsgáltam különböző gyártmányú légszűrőket, kialakításuk és működési elvük szerint. Egy BMW 318is típusú személyautó légszűrőrendszerét és az abba beépíthető légszűrőtípusokat vizsgáltam. Ezen belül is megkülönböztettem hagyományos, utcai használatra tervezett és sportlégszűrőket. Ezt követően elvégeztem 7 különböző gyártmányú légszűrő nyomásesésének kimérését az Áramlástan Tanszék laboratóriumában, egy már meglévő, az említett típusú autóba beépülő légszűrőrendszer segítségével. A mérés során minden egyes légszűrő gyártmánynak 20-20 pontban mértem meg a nyomásesését, illetve szabványos mérőperem segítségével a rendszer térfogatáramát. Ezen értékek és más fizikai paraméterek segítségével utólagos számítások során meghatároztam az egyes gyártmányok nyomásvesztés-térfogatáram, nyomásvesztés-sebesség és a szűrőfelületre ható erő-térfogatáram karakterisztikáit. Ezt követően a mérőeszközök és műszerek hibáinak ismeretében, elvégeztem a térfogatáram mérés hibaszámítását. Ennek során arra jutottam, hogy a mért térfogatáram relatív hibája egyetlen mérési pontban sem haladja meg a 0,8%-os értéket.

A továbbiakban kiegészítettem és helyenként újramodelleztem egyes részeit, a korábban már Kórik Zoltán által elkészített légszűrőrendszer CAD modelljét. Elkészítettem továbbá a vizsgált légszűrők közül háromnak a CAD modelljét, nevezetesen: a Bosch, a Mann Filter és a K&N gyártmányú légszűrőknek, a Pro Engineer Wildfire 5 segítségével. Az egyes modelleket parametrikusan hoztam létre, hogy azok jellemző méreteinek segítségével a későbbiekben, további szűrő típusok vizsgálatának céljából, könnyen létrehozhatóak legyenek. Ezt követően a létrejött geometriákból, elkészítettem a vizsgált rendszer egyes térfogati modelljét. Ennek kialakítása során is szempont volt a további típusú szűrők beépíthetőségének lehetősége, vagyis azok könnyen cserélhetősége.

Az egyes térfogati elemeket és ez által az említett 3 különböző gyártmányú légszűrőt tartalmazó teljes rendszer véges térfogatú modelljét az Ansys Workbench 14-ben hoztam létre. Ennek során létrehoztam az egyes modellek hálóját, melynek során azt tapasztaltam, hogy a Bosch és Mann Filter gyártmányúakat magában foglaló rendszerek elemszáma meghaladja a rendelkezésemre álló erőforrások számítási képességeit. Ezért ezt követően már csak a K&N gyártmányú sportlégszűrővel modellezett légszűrőrendszert vizsgáltam. Erre a rendszerre hálófüggetlenségi vizsgálatot is végeztem. Ezen rendszer véges térfogatú modelljére, beállítottam a numerikus szimuláció peremfeltételeit és szükséges paramétereit. Az így futtatott vizsgálatok eredményeképpen 4 lépésben, iterációval meghatároztam, a 4. mérési pont bemenő értékeinek segítségével, a szűrő permeabilitását melynek során szűrőn mért nyomáseséssel közel azonos mértékűt kaptam eredményül (eltérés: 3%). Ezt követően ábrázoltam még az egyes nyomáseséseket a rendszer egyes metszeti képein, illetve a rendszeren átáramló levegő sebesség-áramvonalait is.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] BMW Techinfo – Technical Information System (2013)
<https://www.bmwtechinfo.com/>
- [2] BMW parts center webcatalogue (2013)
http://www.realoem.com/bmw/showparts.do?model=AF91&mospid=47256&btr=13_0307&hg=13&fg=15
http://www.realoem.com/bmw/showparts.do?model=AF91&mospid=47256&btr=13_1335&hg=13&fg=20
- [3] K&N Performance Air Filter – Technical Information and User’s guide (2013)
<http://www.knfilters.com/filtercharger.htm>
<http://www.knfilters.com/search/product.aspx?prod=33-2059>
- [4] Dr. Lajos Tamás (2013) Por leválasztása gázokból, előadásjegyzet, Levegő-, víztisztaság-védelem, hulladékkezelés BMEGEÁTAG04
- [5] Lautner Péter (2012) Levegővédelem (NGB KM012 1), Szilárd légszennyezők leválasztása
- [6] Dr. Suda Jenő Miklós (2013) Személyautó légmennyiségmérő egység karakterisztikájának mérése, Mérési segédlet, Vegyipari és környezetvédelmi mérések BMEGEVÉAG04
- [7] Dr. Lajos Tamás (2008) Az áramlástan alapjai, 4. átdolgozott és kibővített kiadás
- [8] EMB-001 kézi digitális nyomásmérő berendezés, Áramlástani mérések, Méréselőkészítő óra
- [9] Greisinger GMH3530 Operating Manual, Digital pH-/mV-/Thermometer
- [10] SETRA Model 470 Digital Pressure Transducers, User’s Manual
- [11] Zoltán Kórik (2011) Numerical investigation on the upstream flow condition of the air flow meter in the air intake assembly of a passenger car, MSc Thesis, Final projekt BMEGEÁTMWD2
- [12] ANSYS FLUENT 14.0 User’s Guide, 7.2.3 Porous Media Conditions
- [13] Matthew Balhoff, Andro Mikelic, Mary F. Wheeler (2009) Polynomial filtration laws for low Reynolds number flows through porous media
- [14] Dr. Kristóf Gergely (2012) Hálógenerálás és Peremfeltételek előadásjegyzet, Numerikus áramlástan BMEGEÁTAG03
- [15] BMW produktkatalog (2013)
http://www.bmw-classic.de/produktkatalog/model_overview.php?keyBr=3&keySp=701724&keyEp=Baureihen&slep=7

MELLÉKLET

Az alábbi mellékletekben a légszűrő mérések során mért és számított paramétereket sorolom fel.

M.1.1 Mann Filter gyártmányú légszűrőn átáramló levegő számított paraméterei

t	22,3	[°C]
ρ	1,1879	[kg/m ³]
μ	1,8209E-05	[Pas]

M.1.2 Bosch gyártmányú légszűrőn átáramló levegő számított paraméterei

t	22,5	[°C]
ρ	1,1871	[kg/m ³]
μ	1,8218E-05	[Pas]

M.1.3 Mahle Knecht gyártmányú légszűrőn átáramló levegő számított paraméterei

t	22,5	[°C]
ρ	1,1871	[kg/m ³]
μ	1,8218E-05	[Pas]

M.1.4 Racer gyártmányú légszűrőn átáramló levegő számított paraméterei

t	22,9	[°C]
ρ	1,1855	[kg/m ³]
μ	1,8238E-05	[Pas]

M.1.5 Techneko gyártmányú légszűrőn átáramló levegő számított paraméterei

t	22,9	[°C]
ρ	1,1855	[kg/m ³]
μ	1,8238E-05	[Pas]

M.1.6 Unix gyártmányú légszűrőn átáramló levegő számított paraméterei

t	22,9	[°C]
ρ	1,1855	[kg/m ³]
μ	1,8238E-05	[Pas]

M.1.7 K&N gyártmányú légszűrőn átáramló levegő számított paraméterei

t	24,3	[°C]
ρ	1,1799	[kg/m ³]
μ	1,8298E-05	[Pas]

M.2.1. Mann Filter gyártmányú légszűrő mért és számított értékei

sorszám	Δp_{sz} [Pa]	Δp_1 [Pa]	p_1 [Pa]	Δp_{MP} [Pa]
1	30,28	-97,61	100630,39	11070,00
2	28,34	-89,63	100638,37	10107,00
3	26,10	-78,65	100649,35	9066,30
4	23,99	-70,62	100657,38	8139,40
5	22,06	-64,26	100663,74	7174,80
6	20,39	-56,95	100671,05	6345,10
7	18,71	-50,12	100677,88	5526,10
8	17,06	-44,15	100683,85	4765,43
9	15,52	-39,23	100688,77	4078,32
10	14,05	-33,91	100694,09	3437,20
11	12,73	-29,76	100698,24	2842,93
12	11,33	-25,84	100702,16	2312,63
13	10,05	-21,92	100706,08	1837,84
14	8,72	-18,47	100709,53	1417,80
15	7,45	-15,23	100712,77	1046,26
16	6,22	-11,93	100716,07	735,61
17	5,02	-9,15	100718,85	476,22
18	3,77	-6,55	100721,45	270,68
19	2,58	-4,43	100723,57	126,17
20	1,43	-2,51	100725,49	36,21

sorszám	ϵ [-]	C [-]	q_v [m ³ /s]	v [m/s]	Re*
1	0,9621	0,6198	0,1148	0,1015	1,3240
2	0,9654	0,6198	0,1101	0,0973	1,2696
3	0,9690	0,6199	0,1046	0,0925	1,2070
4	0,9722	0,6200	0,0995	0,0880	1,1476
5	0,9755	0,6201	0,0937	0,0829	1,0812
6	0,9783	0,6202	0,0884	0,0782	1,0199
7	0,9811	0,6203	0,0828	0,0732	0,9547
8	0,9837	0,6204	0,0771	0,0681	0,8891
9	0,9861	0,6206	0,0715	0,0632	0,8247
10	0,9882	0,6208	0,0658	0,0582	0,7590
11	0,9903	0,6210	0,0600	0,0530	0,6919
12	0,9921	0,6212	0,0542	0,0479	0,6255
13	0,9937	0,6215	0,0484	0,0428	0,5588
14	0,9952	0,6219	0,0426	0,0377	0,4918
15	0,9964	0,6224	0,0367	0,0324	0,4234
16	0,9975	0,6231	0,0308	0,0273	0,3557
17	0,9984	0,6241	0,0249	0,0220	0,2869
18	0,9991	0,6257	0,0188	0,0166	0,2170
19	0,9996	0,6285	0,0129	0,0114	0,1489
20	0,9999	0,6359	0,0070	0,0062	0,0807

M.2.2. Bosch gyártmányú légszűrő mért és számított értékei

sorszám	Δp_{sz} [Pa]	Δp_1 [Pa]	p_1 [Pa]	Δp_{MP} [Pa]
1	15,23	-85,73	100642,27	11077,63
2	14,66	-78,54	100649,46	10136,06
3	13,26	-69,26	100658,74	9042,28
4	12,28	-62,04	100665,96	8189,49
5	11,23	-53,74	100674,26	7186,01
6	10,24	-47,36	100680,64	6285,44
7	9,31	-41,24	100686,76	5430,22
8	8,78	-36,54	100691,46	4752,94
9	8,02	-32,42	100695,58	4116,74
10	7,23	-27,62	100700,38	3409,33
11	6,45	-23,92	100704,08	2835,65
12	5,81	-20,43	100707,57	2318,52
13	5,15	-16,97	100711,03	1842,90
14	4,53	-14,07	100713,93	1424,05
15	3,78	-11,24	100716,76	1017,37
16	3,18	-8,47	100719,53	735,30
17	2,58	-6,54	100721,46	480,96
18	1,89	-4,29	100723,71	265,66
19	1,27	-2,52	100725,48	122,10
20	0,67	-1,22	100726,78	35,04

sorszám	ε [-]	C [-]	q_v [m ³ /s]	v [m/s]	Re*
1	0,9621	0,6198	0,1149	0,1189	1,5497
2	0,9653	0,6198	0,1102	0,1141	1,4875
3	0,9691	0,6199	0,1045	0,1082	1,4105
4	0,9720	0,6200	0,0998	0,1033	1,3466
5	0,9754	0,6201	0,0938	0,0972	1,2660
6	0,9785	0,6202	0,0881	0,0912	1,1880
7	0,9814	0,6203	0,0821	0,0850	1,1078
8	0,9837	0,6204	0,0770	0,0797	1,0390
9	0,9859	0,6206	0,0718	0,0744	0,9693
10	0,9883	0,6208	0,0656	0,0679	0,8846
11	0,9903	0,6210	0,0599	0,0620	0,8086
12	0,9921	0,6212	0,0543	0,0562	0,7328
13	0,9937	0,6215	0,0485	0,0502	0,6547
14	0,9951	0,6219	0,0427	0,0443	0,5767
15	0,9965	0,6225	0,0362	0,0375	0,4885
16	0,9975	0,6231	0,0308	0,0319	0,4162
17	0,9984	0,6241	0,0250	0,0259	0,3374
18	0,9991	0,6257	0,0186	0,0193	0,2516
19	0,9996	0,6287	0,0127	0,0132	0,1715
20	0,9999	0,6362	0,0069	0,0071	0,0930

M.2.3. Mahle Knecht gyártmányú légszűrő mért és számított értékei

sorszám	Δp_{sz} [Pa]	Δp_1 [Pa]	p_1 [Pa]	Δp_{MP} [Pa]
1	15,83	-86,79	100641,21	11122,34
2	15,17	-78,36	100649,64	10158,23
3	13,78	-69,95	100658,05	9059,58
4	13,07	-62,81	100665,19	8201,76
5	12,07	-55,34	100672,66	7215,32
6	10,75	-47,59	100680,41	6289,34
7	9,86	-41,24	100686,76	5445,02
8	9,09	-36,85	100691,15	4751,93
9	8,35	-32,42	100695,58	4104,80
10	7,51	-27,86	100700,14	3410,07
11	6,73	-23,79	100704,21	2828,25
12	6,01	-20,23	100707,77	2314,18
13	5,32	-16,83	100711,17	1831,45
14	4,63	-14,29	100713,71	1421,32
15	3,87	-11,22	100716,78	1015,14
16	3,29	-8,73	100719,27	731,19
17	2,63	-6,64	100721,36	484,84
18	1,93	-4,39	100723,61	263,06
19	1,27	-2,58	100725,42	121,77
20	0,69	-1,21	100726,79	34,70

sorszám	ε [-]	C [-]	q_v [m ³ /s]	v [m/s]	Re*
1	0,9620	0,6198	0,1151	0,1191	1,5526
2	0,9653	0,6198	0,1104	0,1143	1,4890
3	0,9690	0,6199	0,1046	0,1083	1,4118
4	0,9720	0,6200	0,0999	0,1034	1,3475
5	0,9753	0,6201	0,0940	0,0973	1,2685
6	0,9785	0,6202	0,0881	0,0912	1,1884
7	0,9814	0,6203	0,0822	0,0851	1,1092
8	0,9838	0,6204	0,0770	0,0797	1,0389
9	0,9860	0,6206	0,0717	0,0743	0,9680
10	0,9883	0,6208	0,0656	0,0679	0,8847
11	0,9903	0,6210	0,0599	0,0620	0,8076
12	0,9921	0,6212	0,0543	0,0562	0,7321
13	0,9937	0,6215	0,0484	0,0501	0,6527
14	0,9951	0,6219	0,0427	0,0442	0,5761
15	0,9965	0,6225	0,0362	0,0374	0,4880
16	0,9975	0,6231	0,0308	0,0318	0,4150
17	0,9983	0,6240	0,0251	0,0260	0,3387
18	0,9991	0,6258	0,0186	0,0192	0,2504
19	0,9996	0,6287	0,0127	0,0131	0,1712
20	0,9999	0,6362	0,0069	0,0071	0,0925

M.2.4. Racer gyártmányú légszűrő mért és számított értékei

sorszám	Δp_{sz} [Pa]	Δp_1 [Pa]	p_1 [Pa]	Δp_{MP} [Pa]
1	24,39	-93,97	100634,03	11088,31
2	22,78	-86,61	100641,39	10132,59
3	21,09	-77,23	100650,77	9051,62
4	19,55	-68,85	100659,15	8179,62
5	18,04	-60,23	100667,77	7174,51
6	16,38	-53,36	100674,64	6261,48
7	15,04	-47,23	100680,77	5441,32
8	13,93	-42,31	100685,69	4751,33
9	12,72	-37,57	100690,43	4098,95
10	11,56	-32,42	100695,58	3412,78
11	10,32	-27,92	100700,08	2826,23
12	9,25	-23,74	100704,26	2311,09
13	8,13	-20,13	100707,87	1832,72
14	7,11	-17,03	100710,97	1419,10
15	6,01	-13,57	100714,43	1012,69
16	5,07	-10,85	100717,15	732,86
17	4,11	-8,28	100719,72	485,63
18	2,97	-5,33	100722,67	260,21
19	2,06	-3,36	100724,64	125,17
20	1,07	-1,59	100726,41	34,87

sorszám	ϵ [-]	C [-]	q_v [m ³ /s]	v [m/s]	Re*
1	0,9621	0,6198	0,1150	0,0986	1,2822
2	0,9653	0,6198	0,1103	0,0946	1,2300
3	0,9690	0,6199	0,1047	0,0898	1,1671
4	0,9720	0,6200	0,0998	0,0856	1,1130
5	0,9755	0,6201	0,0938	0,0805	1,0463
6	0,9786	0,6202	0,0880	0,0754	0,9807
7	0,9814	0,6203	0,0822	0,0705	0,9170
8	0,9838	0,6204	0,0770	0,0661	0,8592
9	0,9860	0,6206	0,0717	0,0615	0,8000
10	0,9883	0,6208	0,0656	0,0563	0,7319
11	0,9903	0,6210	0,0599	0,0514	0,6676
12	0,9921	0,6212	0,0543	0,0465	0,6051
13	0,9937	0,6215	0,0484	0,0415	0,5400
14	0,9951	0,6219	0,0427	0,0366	0,4761
15	0,9965	0,6225	0,0362	0,0310	0,4031
16	0,9975	0,6231	0,0308	0,0264	0,3436
17	0,9983	0,6240	0,0251	0,0216	0,2804
18	0,9991	0,6258	0,0185	0,0158	0,2060
19	0,9996	0,6286	0,0129	0,0110	0,1436
20	0,9999	0,6362	0,0069	0,0059	0,0767

M.2.5. Techneco gyártmányú légszűrő mért és számított értékei

sorszám	Δp_{sz} [Pa]	Δp_1 [Pa]	p_1 [Pa]	Δp_{MP} [Pa]
1	33,07	-106,85	100621,15	11083,95
2	31,13	-96,67	100631,33	10133,48
3	28,92	-86,37	100641,63	9037,52
4	26,76	-77,59	100650,41	8173,63
5	24,38	-68,41	100659,59	7171,61
6	22,39	-60,34	100667,66	6262,15
7	20,52	-53,88	100674,12	5435,71
8	18,94	-47,65	100680,35	4739,62
9	17,35	-42,31	100685,69	4092,97
10	15,53	-36,96	100691,04	3404,72
11	14,12	-31,67	100696,33	2822,07
12	12,57	-27,75	100700,25	2306,54
13	11,13	-23,6	100704,40	1834,93
14	9,65	-19,74	100708,26	1415,31
15	8,16	-15,81	100712,19	1011,45
16	6,91	-12,65	100715,35	773,87
17	5,57	-9,74	100718,26	483,29
18	4,08	-6,46	100721,54	262,71
19	2,81	-4,13	100723,87	124,78
20	1,49	-1,99	100726,01	34,21

sorszám	ϵ [-]	C [-]	q_v [m ³ /s]	v [m/s]	Re*
1	0,9621	0,6198	0,1150	0,0950	1,2352
2	0,9653	0,6198	0,1103	0,0912	1,1851
3	0,9691	0,6199	0,1046	0,0864	1,1237
4	0,9720	0,6200	0,0998	0,0825	1,0720
5	0,9755	0,6201	0,0938	0,0775	1,0079
6	0,9786	0,6202	0,0880	0,0727	0,9450
7	0,9814	0,6203	0,0822	0,0679	0,8831
8	0,9838	0,6204	0,0770	0,0636	0,8268
9	0,9860	0,6206	0,0717	0,0592	0,7702
10	0,9884	0,6208	0,0656	0,0542	0,7044
11	0,9904	0,6210	0,0598	0,0494	0,6428
12	0,9921	0,6212	0,0542	0,0448	0,5824
13	0,9937	0,6215	0,0485	0,0400	0,5206
14	0,9952	0,6219	0,0426	0,0352	0,4581
15	0,9965	0,6225	0,0361	0,0299	0,3882
16	0,9974	0,6230	0,0317	0,0262	0,3401
17	0,9983	0,6241	0,0251	0,0207	0,2695
18	0,9991	0,6258	0,0186	0,0153	0,1994
19	0,9996	0,6286	0,0129	0,0106	0,1381
20	0,9999	0,6364	0,0068	0,0056	0,0732

M.2.6. Unix gyártmányú légszűrő mért és számított értékei

sorszám	Δp_{sz} [Pa]	Δp_1 [Pa]	p_1 [Pa]	Δp_{MP} [Pa]
1	44,52	-117,85	100610,15	11076,85
2	41,76	-107,57	100620,43	10121,64
3	38,48	-95,58	100632,42	9018,86
4	36,06	-86,46	100641,54	8171,92
5	33,14	-76,94	100651,06	7172,76
6	30,43	-68,51	100659,49	6258,41
7	27,93	-60,94	100667,06	5425,74
8	25,83	-54,31	100673,69	4731,09
9	23,71	-48,51	100679,49	4093,76
10	21,42	-42,37	100685,63	3406,4
11	19,34	-37,23	100690,77	2816,69
12	17,32	-32,25	100695,75	2302,27
13	15,32	-27,89	100700,11	1828,73
14	13,41	-23,15	100704,85	1410,48
15	11,24	-18,92	100709,08	1007,44
16	9,61	-15,36	100712,64	737,59
17	7,79	-11,82	100716,18	485,62
18	5,71	-8,11	100719,89	260,12
19	3,9	-5,23	100722,77	120,05
20	2,12	-2,68	100725,32	33,38

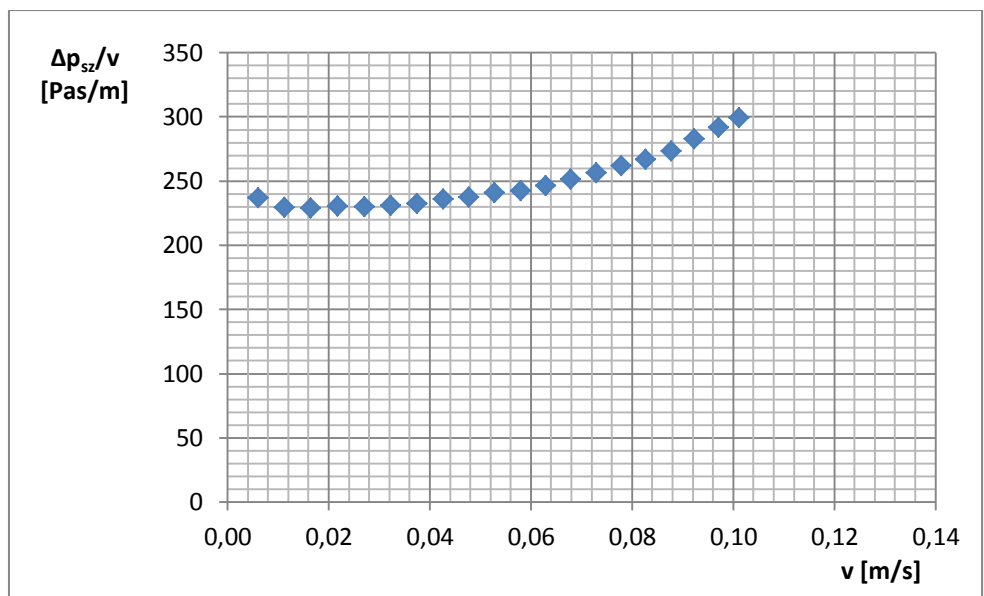
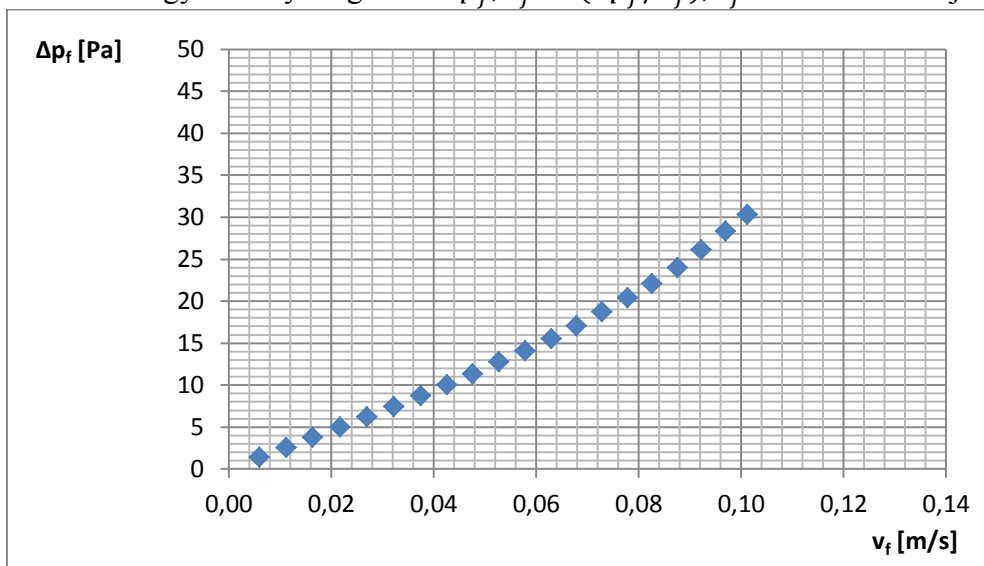
sorszám	ε [-]	C [-]	q_v [m ³ /s]	v [m/s]	Re*
1	0,9621	0,6198	0,1149	0,1232	1,6019
2	0,9654	0,6198	0,1102	0,1182	1,5366
3	0,9691	0,6199	0,1045	0,1120	1,4564
4	0,9720	0,6200	0,0998	0,1070	1,3906
5	0,9755	0,6201	0,0938	0,1006	1,3076
6	0,9786	0,6202	0,0879	0,0943	1,2256
7	0,9814	0,6203	0,0821	0,0881	1,1447
8	0,9838	0,6204	0,0769	0,0824	1,0717
9	0,9860	0,6206	0,0717	0,0769	0,9993
10	0,9884	0,6208	0,0656	0,0703	0,9140
11	0,9904	0,6210	0,0598	0,0641	0,8331
12	0,9921	0,6212	0,0542	0,0581	0,7549
13	0,9937	0,6215	0,0484	0,0519	0,6742
14	0,9952	0,6219	0,0426	0,0456	0,5933
15	0,9966	0,6225	0,0361	0,0387	0,5026
16	0,9975	0,6231	0,0309	0,0331	0,4309
17	0,9983	0,6240	0,0251	0,0270	0,3504
18	0,9991	0,6258	0,0185	0,0198	0,2574
19	0,9996	0,6288	0,0126	0,0135	0,1758
20	0,9999	0,6366	0,0067	0,0072	0,0939

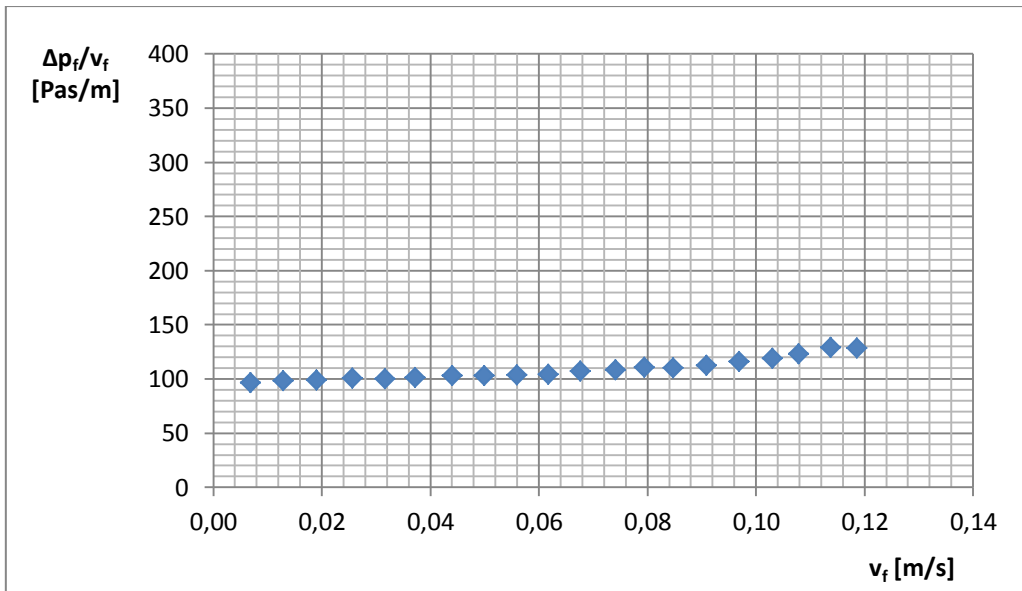
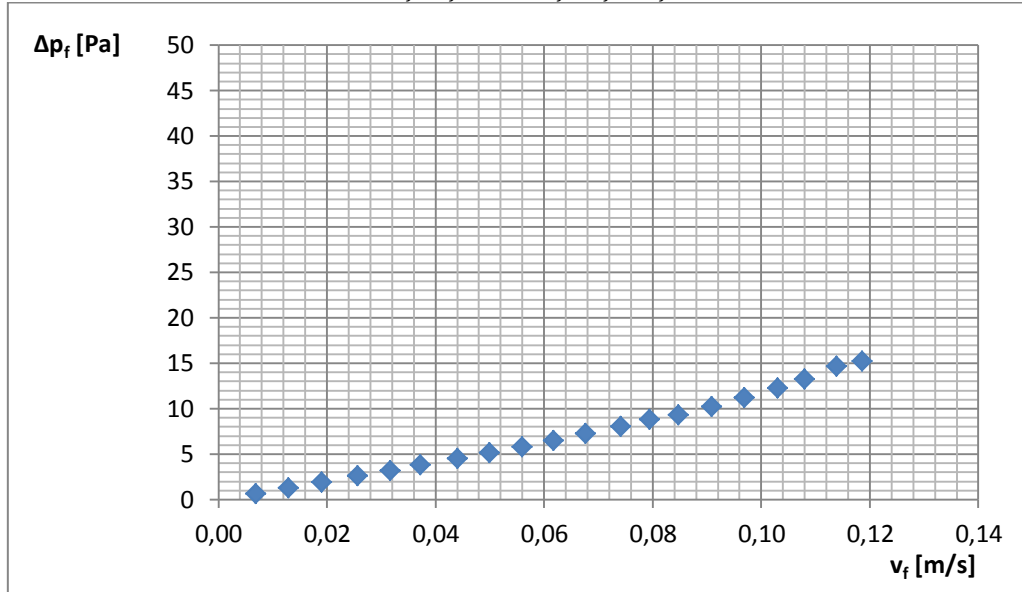
M.2.7. K&N gyártmányú légszűrő mért és számított értékei

sorszám	Δp_{sz} [Pa]	Δp_1 [Pa]	p_1 [Pa]	Δp_{MP} [Pa]
1	5,68	-141,47	100586,53	11091,49
2	5,42	-135,22	100592,78	10153,22
3	5,03	-127,28	100600,72	9019,11
4	4,71	-120,72	100607,28	8175,42
5	4,17	-113,82	100614,18	7177,63
6	3,88	-107,79	100620,21	6261,77
7	3,43	-102,15	100625,85	5431,84
8	3,23	-97,82	100630,18	4741,52
9	2,94	-93,88	100634,12	4102,76
10	2,59	-90,12	100637,88	3403,32
11	2,33	-86,27	100641,73	2821,96
12	2,03	-83,37	100644,63	2310,92
13	1,76	-80,21	100647,79	1826,93
14	1,55	-77,89	100650,11	1418,11
15	1,28	-75,42	100652,58	1014,52
16	1,11	-73,56	100654,44	732,86
17	0,91	-71,57	100656,43	481,29
18	0,69	-69,75	100658,25	263,49
19	0,5	-68,56	100659,44	122,17
20	0,29	-67,62	100660,38	35,41

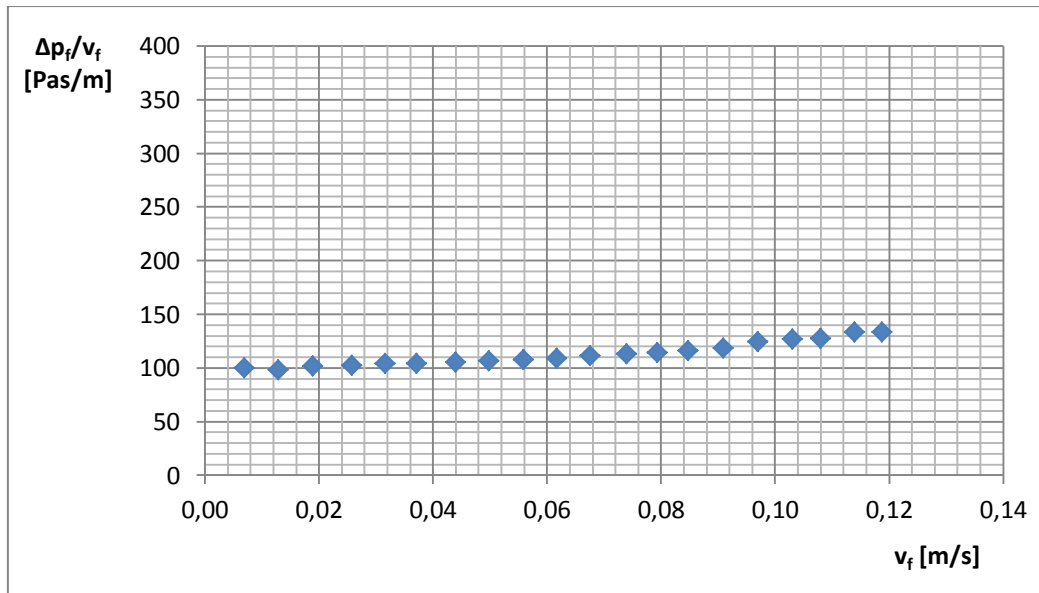
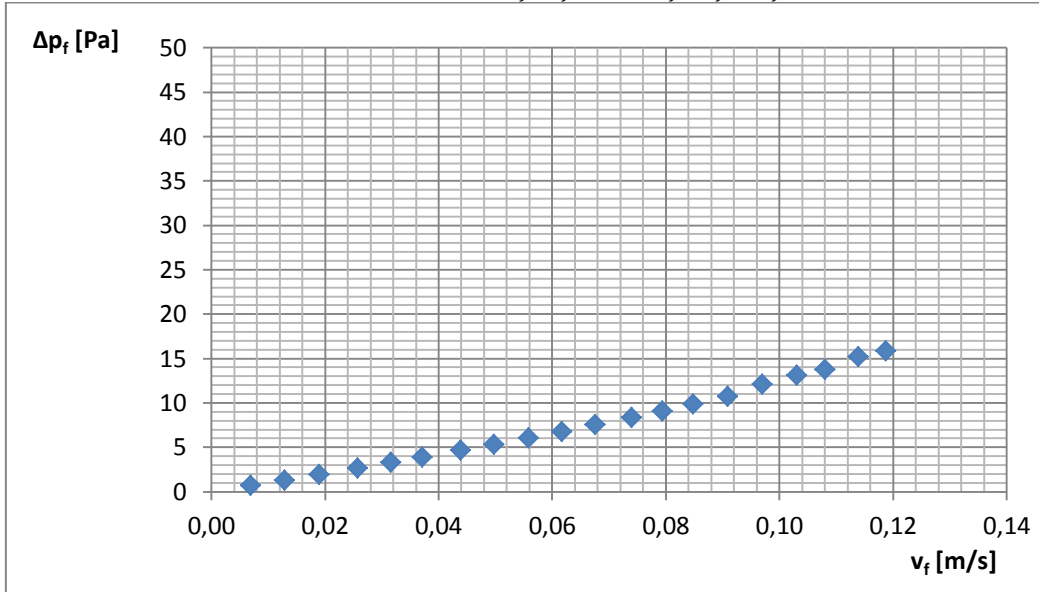
sorszám	ϵ [-]	C [-]	q_v [m ³ /s]	v [m/s]	Re*
1	0,9607	0,6198	0,1169	0,5527	7,1277
2	0,9640	0,6198	0,1122	0,5304	6,8402
3	0,9680	0,6199	0,1062	0,5022	6,4766
4	0,9710	0,6200	0,1015	0,4800	6,1904
5	0,9744	0,6201	0,0956	0,4522	5,8322
6	0,9777	0,6202	0,0897	0,4240	5,4685
7	0,9807	0,6203	0,0837	0,3960	5,1063
8	0,9832	0,6204	0,0784	0,3707	4,7807
9	0,9854	0,6205	0,0732	0,3463	4,4656
10	0,9879	0,6207	0,0668	0,3160	4,0756
11	0,9899	0,6209	0,0611	0,2887	3,7229
12	0,9918	0,6212	0,0553	0,2615	3,3729
13	0,9935	0,6215	0,0493	0,2330	3,0048
14	0,9950	0,6219	0,0435	0,2057	2,6528
15	0,9964	0,6224	0,0369	0,1743	2,2483
16	0,9974	0,6230	0,0315	0,1489	1,9198
17	0,9983	0,6240	0,0254	0,1203	1,5509
18	0,9991	0,6257	0,0189	0,0894	1,1528
19	0,9996	0,6286	0,0129	0,0611	0,7883
20	0,9999	0,6359	0,0070	0,0332	0,4287

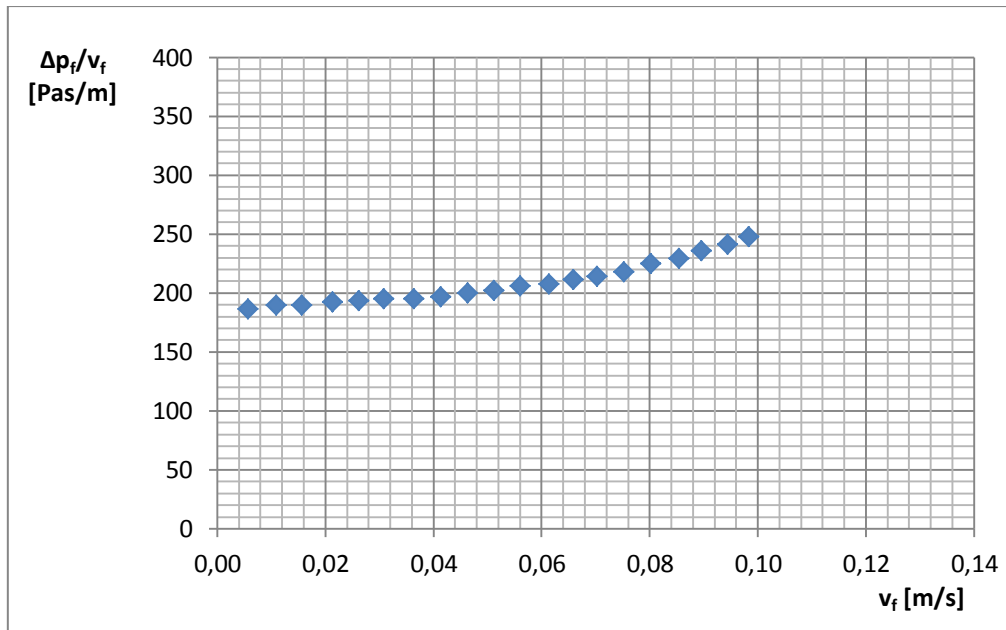
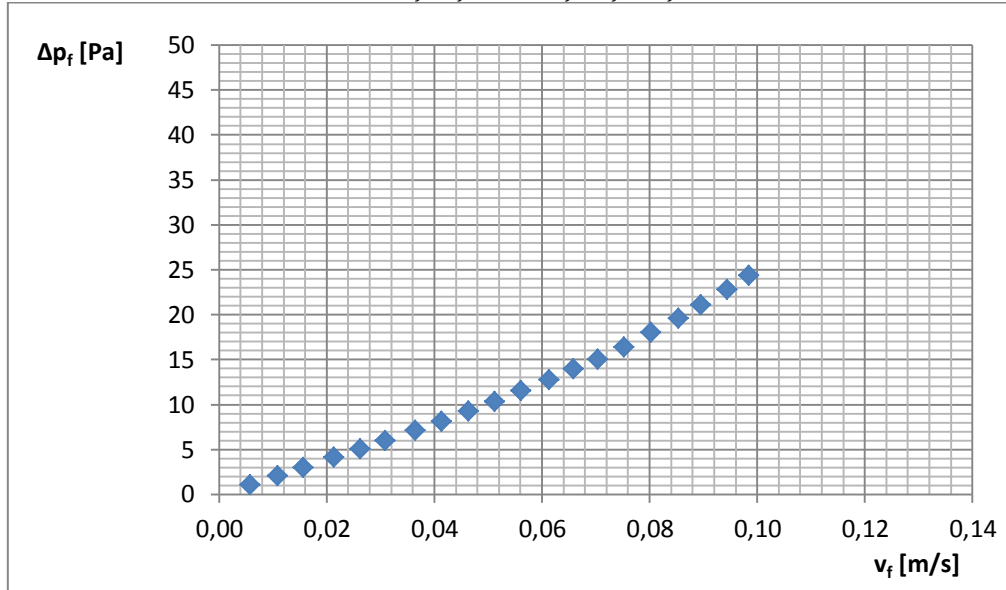
M.3.1. Mann Filter gyártmányú légszűrő $\Delta p_f, v_f$ és $(\Delta p_f/v_f), v_f$ karakterisztikája



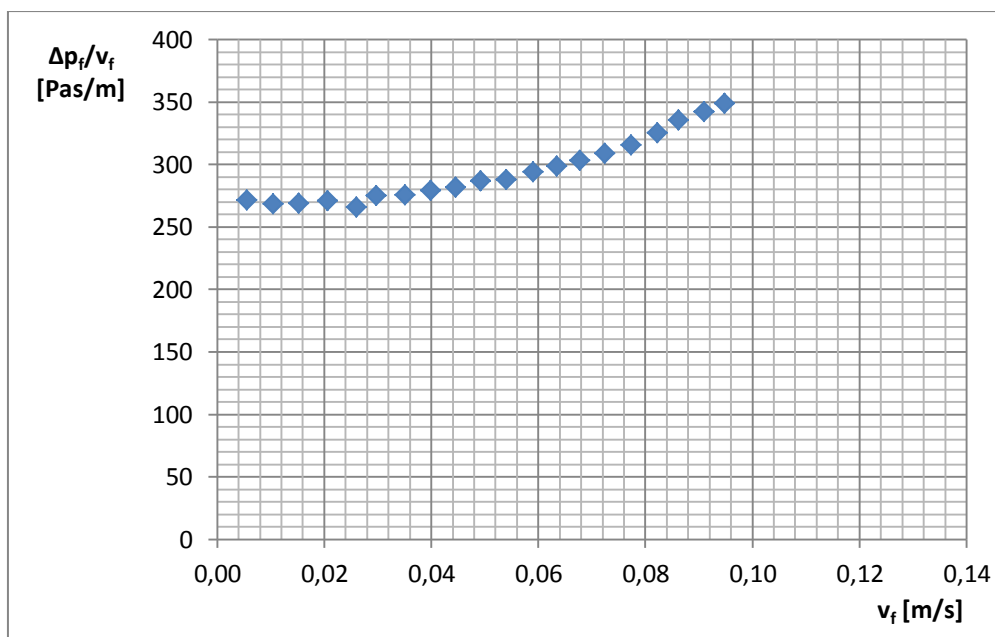
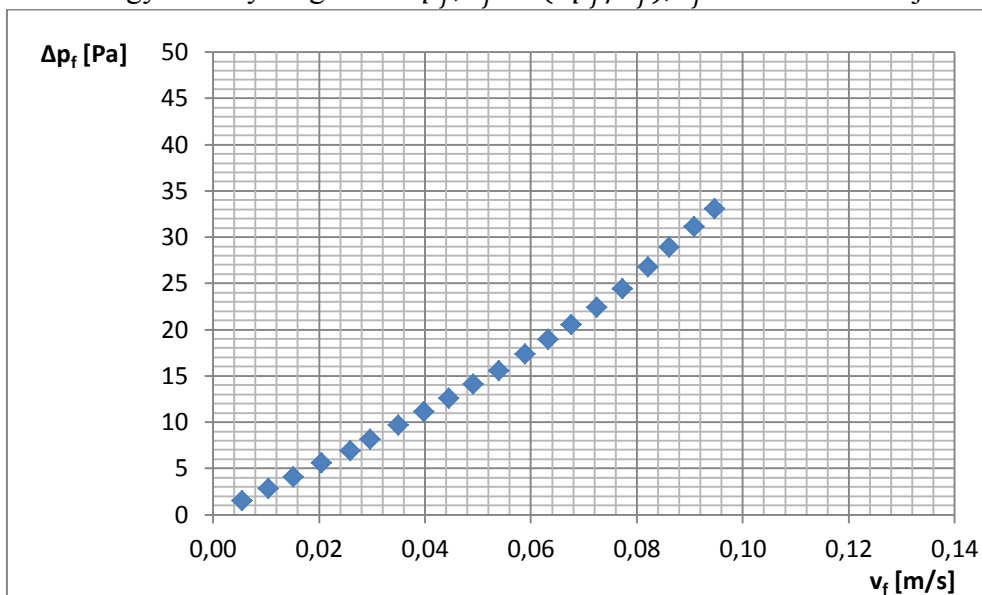
M.3.2. Bosch gyártmányú légszűrő Δp_f , v_f és $(\Delta p_f/v_f)$, v_f karakterisztikája

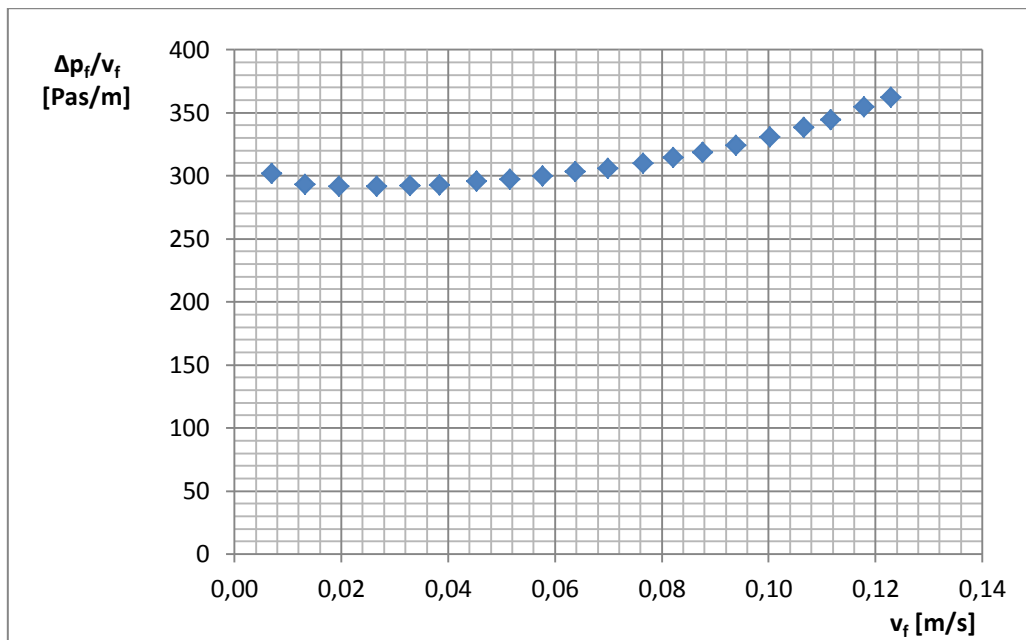
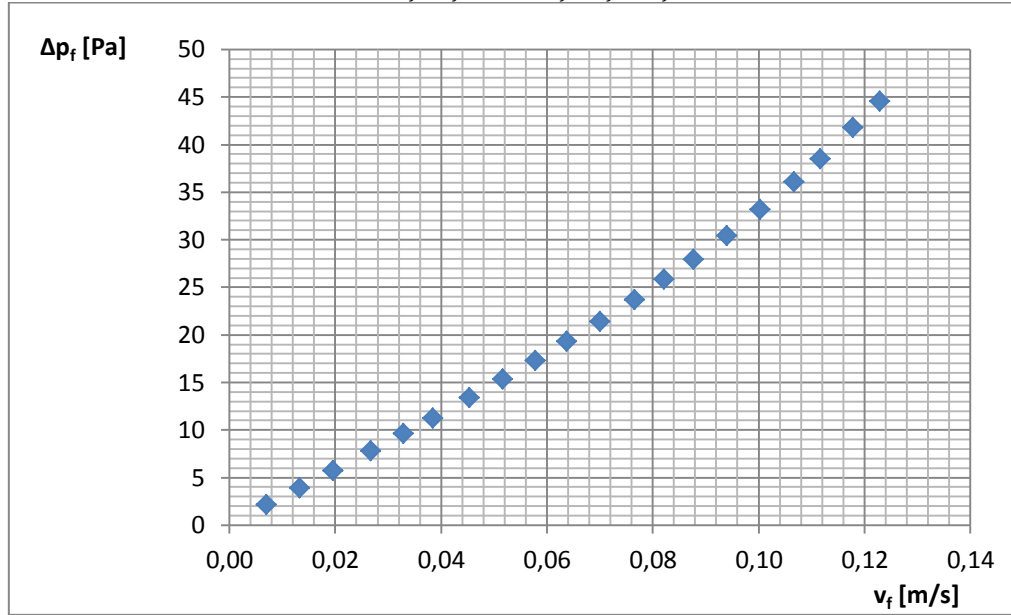
M.3.3. Mahle Knecht gyártmányú légszűrő Δp_f , v_f és $(\Delta p_f/v_f)$, v_f karakterisztikája



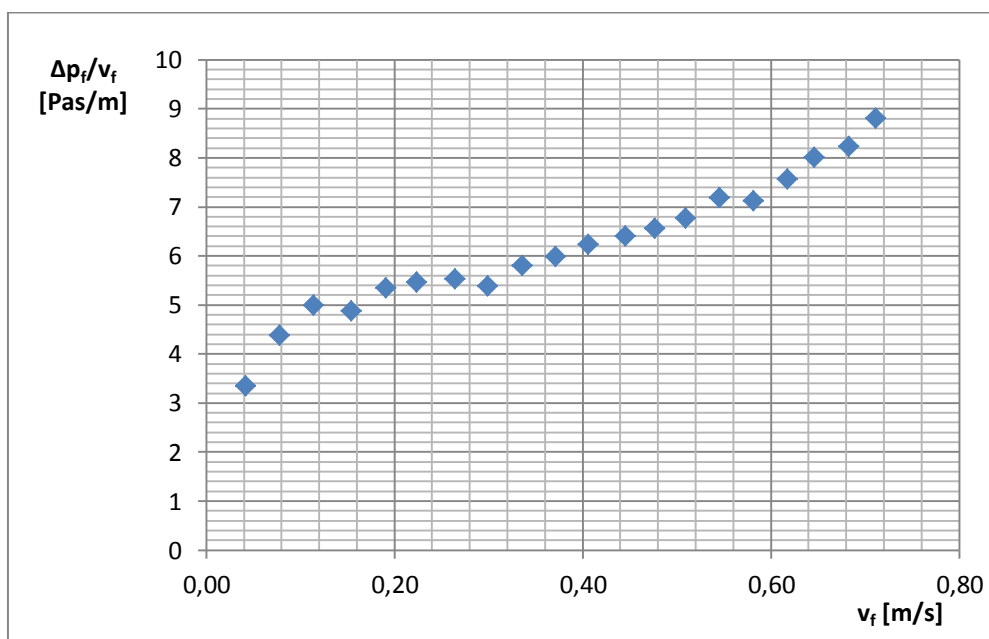
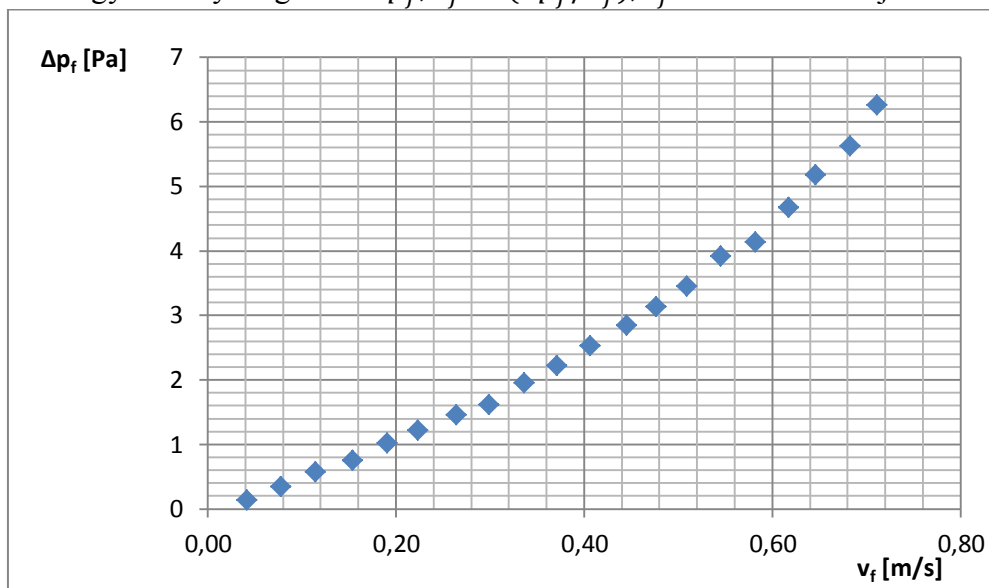
M.3.4. Racer gyártmányú légszűrő Δp_f , v_f és $(\Delta p_f/v_f)$, v_f karakterisztikája

M.3.5. Tecneco gyártmányú légszűrő Δp_f , v_f és $(\Delta p_f/v_f)$, v_f karakterisztikája



M.3.6. Unix gyártmányú légszűrő Δp_f , v_f és $(\Delta p_f/v_f)$, v_f karakterisztikája

M.3.7. K&N gyártmányú légszűrő Δp_f , v_f és $(\Delta p_f/v_f)$, v_f karakterisztikája



M.4.1. Mann Filter gyártmányú légszűrő mérése során mért térfogatáram relatív hibája ($\delta q_v/q_v$) az egyes mérési pontokban

sorszám	$\delta\varepsilon/\varepsilon$ [%]	q_v [m ³ /s]	$\delta\Delta p_{MP}/\Delta p_{MP}$	$\delta T_0/T_0$ [%]	$\delta q_v/q_v$ [%]
1	0,4400	0,1148	0,0002	0,0090	0,7624
2	0,4017	0,1101	0,0002	0,0090	0,7409
3	0,3603	0,1046	0,0002	0,0090	0,7193
4	0,3234	0,0995	0,0002	0,0090	0,7016
5	0,2851	0,0937	0,0003	0,0090	0,6848
6	0,2521	0,0884	0,0003	0,0090	0,6717
7	0,2196	0,0828	0,0004	0,0090	0,6602
8	0,1893	0,0771	0,0004	0,0090	0,6507
9	0,1620	0,0715	0,0005	0,0090	0,6433
10	0,1365	0,0658	0,0006	0,0090	0,6374
11	0,1129	0,0600	0,0007	0,0090	0,6327
12	0,0919	0,0542	0,0009	0,0090	0,6293
13	0,0730	0,0484	0,0011	0,0090	0,6268
14	0,0563	0,0426	0,0014	0,0090	0,6251
15	0,0416	0,0367	0,0019	0,0090	0,6240
16	0,0292	0,0308	0,0027	0,0090	0,6233
17	0,0189	0,0249	0,0042	0,0090	0,6229
18	0,0107	0,0188	0,0074	0,0090	0,6227
19	0,0050	0,0129	0,0159	0,0090	0,6227
20	0,0014	0,0070	0,0552	0,0090	0,6232

M.4.2. Bosch gyártmányú légszűrő mérése során mért térfogatáram relatív hibája ($\delta q_v/q_v$) az egyes mérési pontokban

sorszám	$\delta\varepsilon/\varepsilon$ [%]	q_v [m ³ /s]	$\delta\Delta p_{MP}/\Delta p_{MP}$	$\delta T_0/T_0$ [%]	$\delta q_v/q_v$ [%]
1	0,4403	0,1149	0,0002	0,0089	0,7625
2	0,4028	0,1102	0,0002	0,0089	0,7415
3	0,3593	0,1045	0,0002	0,0089	0,7188
4	0,3254	0,0998	0,0002	0,0089	0,7025
5	0,2855	0,0938	0,0003	0,0089	0,6849
6	0,2497	0,0881	0,0003	0,0089	0,6708
7	0,2157	0,0821	0,0004	0,0089	0,6589
8	0,1888	0,0770	0,0004	0,0089	0,6506
9	0,1635	0,0718	0,0005	0,0089	0,6437
10	0,1354	0,0656	0,0006	0,0089	0,6371
11	0,1126	0,0599	0,0007	0,0089	0,6327
12	0,0921	0,0543	0,0009	0,0089	0,6294
13	0,0732	0,0485	0,0011	0,0089	0,6269
14	0,0566	0,0427	0,0014	0,0089	0,6251
15	0,0404	0,0362	0,0020	0,0089	0,6239
16	0,0292	0,0308	0,0027	0,0089	0,6233
17	0,0191	0,0250	0,0042	0,0089	0,6229
18	0,0106	0,0186	0,0075	0,0089	0,6227
19	0,0048	0,0127	0,0164	0,0089	0,6227
20	0,0014	0,0069	0,0571	0,0089	0,6232

M.4.3. Mahle Knecht gyártmányú légszűrő mérése során mért térfogatáram relatív hibája ($\delta q_v/q_v$) az egyes mérési pontokban

sorszám	$\delta\varepsilon/\varepsilon$ [%]	q_v [m ³ /s]	$\delta\Delta p_{MP}/\Delta p_{MP}$	$\delta T_0/T_0$ [%]	$\delta q_v/q_v$ [%]
1	0,4421	0,1151	0,0002	0,0089	0,7636
2	0,4037	0,1104	0,0002	0,0089	0,7420
3	0,3600	0,1046	0,0002	0,0089	0,7192
4	0,3259	0,0999	0,0002	0,0089	0,7027
5	0,2867	0,0940	0,0003	0,0089	0,6854
6	0,2499	0,0881	0,0003	0,0089	0,6709
7	0,2163	0,0822	0,0004	0,0089	0,6591
8	0,1888	0,0770	0,0004	0,0089	0,6506
9	0,1631	0,0717	0,0005	0,0089	0,6436
10	0,1355	0,0656	0,0006	0,0089	0,6371
11	0,1123	0,0599	0,0007	0,0089	0,6326
12	0,0919	0,0543	0,0009	0,0089	0,6293
13	0,0727	0,0484	0,0011	0,0089	0,6268
14	0,0564	0,0427	0,0014	0,0089	0,6251
15	0,0403	0,0362	0,0020	0,0089	0,6239
16	0,0290	0,0308	0,0027	0,0089	0,6233
17	0,0193	0,0251	0,0041	0,0089	0,6229
18	0,0104	0,0186	0,0076	0,0089	0,6227
19	0,0048	0,0127	0,0164	0,0089	0,6227
20	0,0014	0,0069	0,0576	0,0089	0,6233

M.4.4. Racer gyártmányú légszűrő mérése során mért térfogatáram relatív hibája ($\delta q_v/q_v$) az egyes mérési pontokban

sorszám	$\delta\varepsilon/\varepsilon$ [%]	q_v [m ³ /s]	$\delta\Delta p_{MP}/\Delta p_{MP}$	$\delta T_0/T_0$ [%]	$\delta q_v/q_v$ [%]
1	0,4407	0,1150	0,0002	0,0087	0,7628
2	0,4027	0,1103	0,0002	0,0087	0,7415
3	0,3597	0,1047	0,0002	0,0087	0,7190
4	0,3250	0,0998	0,0002	0,0087	0,7023
5	0,2851	0,0938	0,0003	0,0087	0,6847
6	0,2488	0,0880	0,0003	0,0087	0,6704
7	0,2162	0,0822	0,0004	0,0087	0,6590
8	0,1888	0,0770	0,0004	0,0087	0,6506
9	0,1628	0,0717	0,0005	0,0087	0,6435
10	0,1356	0,0656	0,0006	0,0087	0,6372
11	0,1123	0,0599	0,0007	0,0087	0,6326
12	0,0918	0,0543	0,0009	0,0087	0,6293
13	0,0728	0,0484	0,0011	0,0087	0,6268
14	0,0564	0,0427	0,0014	0,0087	0,6251
15	0,0402	0,0362	0,0020	0,0087	0,6239
16	0,0291	0,0308	0,0027	0,0087	0,6233
17	0,0193	0,0251	0,0041	0,0087	0,6229
18	0,0103	0,0185	0,0077	0,0087	0,6227
19	0,0050	0,0129	0,0160	0,0087	0,6227
20	0,0014	0,0069	0,0574	0,0087	0,6232

M.4.5. Tecneco gyártmányú légszűrő mérése során mért térfogatáram relatív hibája ($\delta q_v/q_v$) az egyes mérési pontokban

sorszám	$\delta\varepsilon/\varepsilon$ [%]	q_v [m ³ /s]	$\delta\Delta p_{MP}/\Delta p_{MP}$	$\delta T_0/T_0$ [%]	$\delta q_v/q_v$ [%]
1	0,4406	0,1150	0,0002	0,0087	0,7627
2	0,4028	0,1103	0,0002	0,0087	0,7415
3	0,3592	0,1046	0,0002	0,0087	0,7188
4	0,3248	0,0998	0,0002	0,0087	0,7022
5	0,2850	0,0938	0,0003	0,0087	0,6847
6	0,2488	0,0880	0,0003	0,0087	0,6705
7	0,2160	0,0822	0,0004	0,0087	0,6590
8	0,1883	0,0770	0,0004	0,0087	0,6504
9	0,1626	0,0717	0,0005	0,0087	0,6435
10	0,1353	0,0656	0,0006	0,0087	0,6371
11	0,1121	0,0598	0,0007	0,0087	0,6326
12	0,0916	0,0542	0,0009	0,0087	0,6293
13	0,0729	0,0485	0,0011	0,0087	0,6268
14	0,0562	0,0426	0,0014	0,0087	0,6251
15	0,0402	0,0361	0,0020	0,0087	0,6239
16	0,0307	0,0317	0,0026	0,0087	0,6233
17	0,0192	0,0251	0,0041	0,0087	0,6229
18	0,0104	0,0186	0,0076	0,0087	0,6227
19	0,0050	0,0129	0,0160	0,0087	0,6227
20	0,0014	0,0068	0,0585	0,0087	0,6233

M.4.6. Unix gyártmányú légszűrő mérése során mért térfogatáram relatív hibája ($\delta q_v/q_v$) az egyes mérési pontokban

sorszám	$\delta\varepsilon/\varepsilon$ [%]	q_v [m ³ /s]	$\delta\Delta p_{MP}/\Delta p_{MP}$	$\delta T_0/T_0$ [%]	$\delta q_v/q_v$ [%]
1	0,4404	0,1149	0,0002	0,0087	0,7626
2	0,4024	0,1102	0,0002	0,0087	0,7413
3	0,3585	0,1045	0,0002	0,0087	0,7184
4	0,3248	0,0998	0,0002	0,0087	0,7022
5	0,2851	0,0938	0,0003	0,0087	0,6847
6	0,2487	0,0879	0,0003	0,0087	0,6704
7	0,2156	0,0821	0,0004	0,0087	0,6589
8	0,1880	0,0769	0,0004	0,0087	0,6503
9	0,1626	0,0717	0,0005	0,0087	0,6435
10	0,1353	0,0656	0,0006	0,0087	0,6371
11	0,1119	0,0598	0,0007	0,0087	0,6326
12	0,0915	0,0542	0,0009	0,0087	0,6293
13	0,0726	0,0484	0,0011	0,0087	0,6268
14	0,0560	0,0426	0,0014	0,0087	0,6251
15	0,0400	0,0361	0,0020	0,0087	0,6239
16	0,0293	0,0309	0,0027	0,0087	0,6233
17	0,0193	0,0251	0,0041	0,0087	0,6229
18	0,0103	0,0185	0,0077	0,0087	0,6227
19	0,0048	0,0126	0,0167	0,0087	0,6227
20	0,0013	0,0067	0,0599	0,0087	0,6233

M.4.7. K&N gyártmányú légszűrő mérése során mért térfogatáram relatív hibája ($\delta q_v/q_v$) az egyes mérési pontokban

sorszám	$\delta\varepsilon/\varepsilon$ [%]	q_v [m ³ /s]	$\delta\Delta p_{MP}/\Delta p_{MP}$	$\delta T_0/T_0$ [%]	$\delta q_v/q_v$ [%]
1	0,4411	0,1150	0,0002	0,0088	0,7630
2	0,4037	0,1104	0,0002	0,0088	0,7420
3	0,3586	0,1045	0,0002	0,0088	0,7185
4	0,3250	0,0998	0,0002	0,0088	0,7023
5	0,2854	0,0938	0,0003	0,0088	0,6849
6	0,2489	0,0879	0,0003	0,0088	0,6705
7	0,2159	0,0822	0,0004	0,0088	0,6590
8	0,1885	0,0770	0,0004	0,0088	0,6505
9	0,1631	0,0718	0,0005	0,0088	0,6436
10	0,1353	0,0655	0,0006	0,0088	0,6371
11	0,1122	0,0598	0,0007	0,0088	0,6326
12	0,0918	0,0542	0,0009	0,0088	0,6293
13	0,0726	0,0483	0,0011	0,0088	0,6268
14	0,0564	0,0427	0,0014	0,0088	0,6251
15	0,0403	0,0362	0,0020	0,0088	0,6239
16	0,0291	0,0308	0,0027	0,0088	0,6233
17	0,0191	0,0250	0,0042	0,0088	0,6229
18	0,0105	0,0186	0,0076	0,0088	0,6227
19	0,0049	0,0127	0,0164	0,0088	0,6227
20	0,0014	0,0069	0,0565	0,0088	0,6232