

بررسی آزمایشگاهی کاهش آلودگی دود سیاه موتور دیزل OM314 تنفس طبیعی توسط جاذب مرطوب

محسن قاضی خانی¹، سید محمود ابوالحسن علوی²، علی قاضی خانی³، محمد ابراهیم فیض⁴، محمد شریف زاده⁵، مرتضی کیمیا قلم⁶

¹دانشیار، دانشگاه فردوسی دانشکده مهندسی M_Ghazikhani@yahoo.com

²استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد دانشکده مهندسی m_a_alavi2002@yahoo.com

³دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد دانشکده مهندسی Ali_Ghazikhani@yahoo.com

⁴دانشجوی کارشناسی، دانشگاه فردوسی دانشکده مهندسی m.e.feyz@gmail.com

⁵دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی دانشکده مهندسی Mohammad.Sharifzade@gmail.com

⁶دانشجوی کارشناسی، دانشگاه فردوسی دانشکده مهندسی m_kimiaghalam@yahoo.com

چکیده

با توجه به محدود شدن حد نهائی آلاینده های تولید شده توسط موتور های احتراق داخلی به خصوص دیزل و همچنین با توجه به اهمیت آلاینده دوده در تخریب محیط زیست لزوم بهره گیری از روشهای بهینه برای جذب دوده منتشر شده از موتور دیزل افزایش یافته است. در این تحقیق روش نوینی برای جلوگیری از انتشار دود سیاه در موتور دیزل بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. در این روش دوده در محیطی مرطوب جذب میشود و دوده جمع آوری شده قابلیت بازیابی برای مصارف صنعتی را دارد. این آزمایش بر روی موتور تنفس طبیعی OM314 توسط روش تست ECE-R49 انجام شده است و میزان آلودگی دود سیاه با استانداردهای EURO1 و EURO2 مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: موتور دیزل، آلاینده دوده، جاذب مرطوب.

مقدمه

در دهه گذشته، حد نهائی آلاینده موتورهای درون سوز بطور چشمگیری کاهش یافته است. مزایای متعددی موجب افزایش روز افزون توجه صنایع خودروسازی به موتورهای دیزل شده است. از جمله برتری های موتور دیزل نسبت به موتور بنزینی میتوان به بازده حرارتی بالاتر، آلاینده های کمتر و سوخت ارزان تر اشاره کرد. عوامل متعددی موجود هستند که طراح در هنگام طراحی با تغییر آنها می تواند موجب بهبود انتشار آلاینده ها و در ضمن افزایش بهره وری در مصرف سوخت توسط موتورهای دیزل شود. برخی از این عوامل عبارتند از شکل محفظه احتراق، محل و زاویه پاشش انژکتورها، نرخ تزریق سوخت و سایر عوامل. این دسته از راهکارها برای کاهش میزان آلاینده ها اصولاً به روشهای پیشگیرانه معروفند. علاوه بر این

روشها، روشهای دیگری تحت عنوان محدود کننده¹ نیز برای کنترل آلاینده ها به کار می روند. این روش ها به طور کلی بر پایه جلوگیری از خروج آلاینده ها از موتور استوارند مانند انواع فیلترها و عملگر های شیمیائی. یکی از آلاینده های بسیار مهم در موتورهای دیزل آلاینده دوده می باشد. این آلاینده که عمدتاً متشکل از هیدرو کربنهای نسوخته است در شکلها و ترکیبات متنوعی می باشد و انتشار آن ناشی از شرکت نکردن درصدی از سوخت مصرفی در واکنشهای احتراق می باشد. این امر بدلیل نوع احتراق دیزل است که از نسبت محلی سوخت به هوای زیاد درون محفظه احتراق نشئت می گیرد. احتراق ناقص و جذب درصدی از سوخت بر روی دیواره محفظه احتراق و شکافهای ریز آن دیگر عوامل مهم دور ماندن سوخت از احتراق کامل می باشند. از روشهای رایج به دام انداختن دوده عبارتند از فیلترهای سرامیکی، محفظه های متخلخل آلومینیومی، محفظه های فیبری وغیره [1]. از جمله چالشهای رو در روی اینگونه فیلترها میتوان به ظرفیت محدود آنان در جذب دوده، دشواری و پر هزینه بودن آنها هنگام بازیابی و ایجاد پس فشار در مسیر آگزوز اشاره کرد. مشخصاً برای کنترل آلاینده دوده در موتورهای دیزل از دو روش عمده کاتالیزورهای اکسیدکننده (DOC) و فیلتر های دوده (DPF) یا بصورت ترکیب این دو استفاده می شود. کاتالیزورها موجب اکسید کردن هیدروکربن ها، کربن مونواکسید و اکسید نیتروژن می شوند. حاصل اکسید کردن دوده مجدداً در این کاتالیزورها می سوزد تا کاتالیزور بازیابی شود. در روش استفاده از فیلتر، دوده میتواند تا حد 90٪ جذب شود. مشخص شدن ماهیت دوده در کاهش تولید و انتشار آن در موتورهای دیزل بسیار مورد اهمیت می باشد. بطور کلی خواص دوده سیاه در آزمایشات ثابت کرده است که روشهای مکانیکی برای کنترل آن اصولاً دشوار و پرهزینه هستند [2]. برخی از فیلترهای مکانیکی برای کنترل انتشار دوده شامل محفظه های متخلخل در مطالعه [3] بررسی شده اند و اثر میزان تخلخل روی

شود . سپس با دانستن چگالی سوخت دبی جرمی سوخت محاسبه می شود.

جدول 1: مشخصات موتور

مدل	OM314 تنفس طبیعی
تعداد سیلندر	4
قطر سیلندر	97 mm
کورس پیستون	128 mm
حجم جابجایی	3.78 لیتر
نسبت تراکم	17:1
قدرت ماکزیمم	125 hp
گشتاور ماکزیمم	235 N.m
سرعت ماکزیمم	2800 rpm
فشار تزریق سوخت	200 bar

برای اندازه گیری حجم هوای ورودی از روش مخزن هوا و اریفیس استفاده شده است. در این روش هوای ورودی به موتور ابتدا از یک اریفیس عبور می کند سپس با اندازه گیری دمای هوا و اختلاف فشار دو طرف اریفیس دبی جرمی هوای مصرفی محاسبه می شود.

سرعت دورانی موتور را دورسنج الکتریکی به صورت نوسان ولتاژ القایی در پیچک حسگر، اندازه گیری می کند. برای اندازه گیری دماهای ورودی به مخزن هوا ، اگزوز قبل و بعد از جاذب از سه عدد ترموکوپل نوع K استفاده شده است . این ترموکوپل ها توسط دو عدد کارت الکترونیکی واسط به یک PC متصل شده اند که از این طریق و به وسیله نرم افزار مربوطه دماهای مذکور اندازه گیری می شوند. شکل 1 نمایی از بستر تست را نشان می دهد .

افت فشار و میزان به دام انداختن دوده گزارش شده اند. برای توصیف رفتار فیلترهای دوده از روش شبیه سازی بطور گسترده استفاده شده است. در تحقیق [4] از یک مدل جریان لغزشی برای شبیه سازی حرکت گازهای اگزوز درون محفظه فیلتر استفاده شده است. مطابق این تحقیق منحنی افت فشار که متناسب با زمان تغییر می کند بر اساس زمانهای بازیابی بهینه شده و مدل نهائی ارائه شده است. همچنین در مطالعه [5] عوامل مؤثر بر بازده فیلتر بصورت عددی بررسی شده است. در تحقیق [6] اثر رسوب دوده روی پس فشار اگزوز در موتور دیزل توسط مدل عددی Lattice Boltzman ارائه شده است. در مطالعه [7] نیز یک مدل یک بعدی حالت گذرا برای بررسی تاثیرات دمائی روی نرخ جذب دوده توسط فیلترهای دوده دیزل بصورت عددی پیاده سازی شده است. نتایج نشان می دهد که استراتژی های کنترل جریان فعال می تواند بازده بیشتری را برای عملیات فیلتراسیون به همراه داشته باشد.

در تحقیق حاضر، یک روش جدید برای جذب دوده سیاه موتورهای دیزل بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. این روش علاوه بر توانائی زیاد در جذب دوده دارای افت فشار بسیار ناچیزی در مسیر اگزوز می باشد که در مقایسه با سایر روشهای جذب دوده اهمیت قابل ملاحظه ای دارد. علاوه بر این، بازیابی این نوع جاذب دوده به آسانی میسر است. طرح خلافتان ای که در این جاذب استفاده شده است شامل یک محفظه مرطوب بوده که آب در آن چرخش دارد. گازهای اگزوز از یک سمت محفظه وارد آن شده و پس از تماس با محیط مرطوب از محفظه خارج می شوند. تماس دوده و آب موجب جذب بخش زیادی از دوده موجود در اگزوز توسط آب می شود. بازیابی آب در حال گردش امکان جداسازی دوده از آب را برای مصارف صنعتی فراهم می کند. این آزمایش بر روی موتور دیزل OM314 در قالب 26 مرحله تست انجام شده است.

بستر تست

در این آزمایش از موتور تنفس طبیعی OM314 استفاده شده است. این موتور، آب خنک، چهار زمانه ، از نوع تزریق مستقیم و پمپ انژکتور از نوع ردیفی است. مشخصات این موتور در جدول 1 آمده است.

دینامومتر استفاده شده از نوع هیدرولیکی مدل هنن-فرود DPX با ظرفیت 112 کیلو وات (150 اسب بخار) با بیشینه سرعت 7500 دور بر دقیقه است. برای استفاده از دینامومتر نیاز به یک سیستم بسته آب رسانی است. این سیستم شامل دو مخزن 5000 لیتری و 500 لیتری و یک پمپ است. مخزن کوچکتر آب خروجی از دینامومتر را جمع آوری می کند و پمپ هر 15 دقیقه یک بار آب این مخزن را به مخزن بزرگتر تخلیه می کند.

برای اندازه گیری جریان سوخت مصرفی از روش پیپت مدرج با کمک یک کرنومتر استفاده شده است. در این روش زمان مصرف 50 سی سی از سوخت به کمک کرنومتر دیجیتالی اندازه گیری می

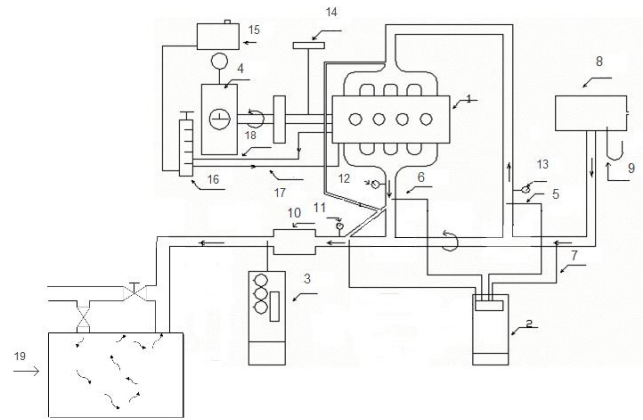
آب به خروجی اگزوز می باشد. آب ورودی و خروجی از جاذب دارای دبی یکسانی بوده و باعث پایین نگه داشتن دمای آب می شود.

روش آزمایش

برای بررسی اثر جاذب مرطوب روی دوده از روش آزمون ECE-R49 استفاده شده است. این آزمون دارای سیزده حالت است که همراه با ضرایب وزنی آن در جدول (2) آمده است

جدول 2: سیزده حالت تست ECE-R49

Mode No.	Speed	Load, %	Weighting Factors	
			R49	US
1	idle	-	0.25/3	0.20/3
2	maximum torque speed	10	0.08	0.08
3		25	0.08	0.08
4		50	0.08	0.08
5		75	0.08	0.08
6	100	0.25	0.08	0.08
7	idle	-	0.25/3	0.20/3
8	rated power speed	100	0.10	0.08
9		75	0.02	0.08
10		50	0.02	0.08
11		25	0.02	0.08
12	10	0.02	0.02	0.08
13	idle	-	0.25/3	0.20/3



- 1- Engine
- 2- Computer
- 3- AVL-415-Smoke Meter
- 4- Hydraulic Dynamometer
- 5- Thermocouple Type
- 6- Thermocouple Type
- 7- Thermocouple Type
- 8- Surge Tank
- 9- Manometer
- 10- Exhaust Silencer
- 11- Pressure Gage
- 12- Pressure Gage
- 13- Pressure Gage
- 14- Electrical Speed Meter
- 15- Fuel Reservoir
- 16- Fuel Gage
- 17- Fuel Inlet
- 18- Reverse Fuel
- 19- Absorber

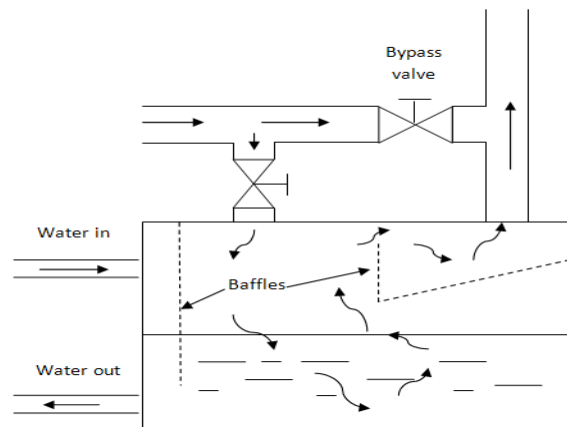
شکل 1: نمایی از بستر تست

سیزده حالت آزمون ECE-R49 در این آزمایش در جدول (3) آمده است.

جدول 3: نقاط آزمون

حالت	سرعت (rpm)	گشتاور (Nm)	ضریب وزنی
1	800	0	0.083
2	1800	18	0.08
3	1800	45	0.08
4	1800	90	0.08
5	1800	135	0.08
6	1800	180	0.25
7	800	0	0.083
8	2800	160	0.10
9	2800	120	0.02
10	2800	80	0.02
11	2800	40	0.02
12	2800	16	0.02
13	800	0	0.083

جاذب مورد استفاده به شکل مکعب مستطیل همراه با سیستم ورودی و خروجی آب طراحی شده است. صفحات جدا کننده (بافل) برای جلوگیری از پاشش آب به درون خروجی جاذب نصب شده اند. شکل 2 جزئیات بیشتری از جاذب را نشان می دهد.



شکل 2: جاذب مرطوب

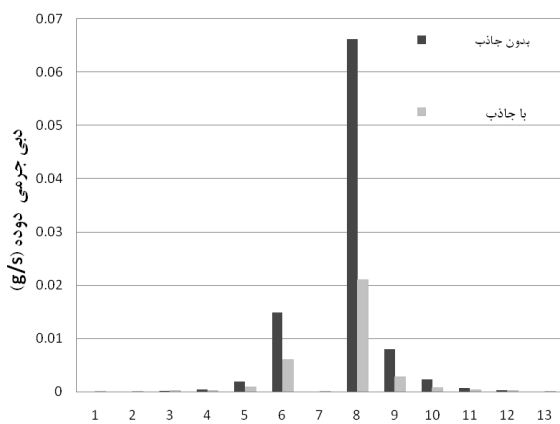
برای اندازه گیری دوده اگزوز از تحلیل گر AVL-415 استفاده شده که در بستر تست بعد از جاذب قرار می گیرد. همان طور که در شکل 2 مشخص است موج گیرهایی در مسیر دود ورودی به جاذب طراحی شده است علت این امر پیشگیری از پاشش آب و نفوذ

T_e دمای اگزوز بر حسب درجه سانتیگراد می باشد.

ارائه نتایج و تحلیل آنها

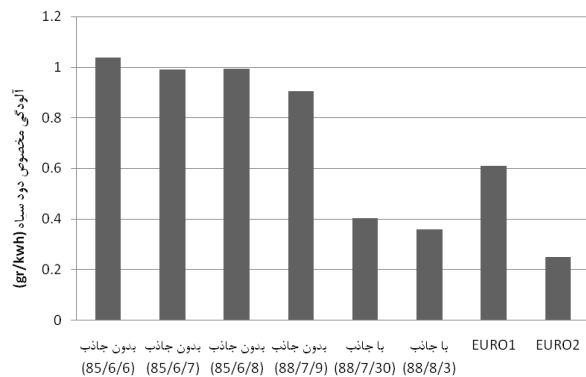
تغییرات دبی جرمی دوده

همانطور که در شکل 3 مشخص است به طور کلی جاذب مرطوب موجب کاهش انتشار دوده می شود. با افزایش گشتاور موتور تاثیر جاذب مرطوب بر جذب دوده موجود در اگزوز به طور مشخصی افزایش می یابد. از آنجایی که در گشتاورهای بالا، دمای اگزوز بالا بوده و به همان نسبت چگالی گازهای خروجی پائین است سرعت گاز خروجی از اگزوز بیشتر می باشد. لذا اختلاط دود و آب در محیط مرطوب افزایش می یابد. همچنین چون در گشتاورهای بالا تمرکز دوده در اگزوز بیشتر است، شانس درگیر شدن ذرات دوده در آب نیز افزایش می یابد.



شکل 3: تغییرات دبی جرمی دوده

برای ارائه مقایسه ای بهتر میتوان تاثیر جاذب را بر آلودگی مخصوص دوده سیاه در قالب نمودار زیر بررسی کرد.



شکل 4: تغییرات آلودگی مخصوص دوده سیاه

چهار ستون سمت چپ مقدار آلودگی مخصوص دوده سیاه بدون جاذب را نشان می دهد. آزمایشات بدون جاذب سه ستون سمت چپ شکل 4 مربوط به [8] می باشد. مشاهده می شود که در بدترین حالت کار موتور همرا جاذب، مقدار دوده تولید شده در حدود نصف بهترین حالت کار موتور بدون جاذب است. تاثیر روی راندمان حجمی

آزمایش در دو مرحله کلی بدون جاذب و با جاذب انجام شده است به این ترتیب که ابتدا برای هر یک از سیزده حالت آزمون ECE-R49 پس از رسیدن به حالت پایدار موتور، داده های مربوط بدون جاذب ذخیره شده و سپس با نصب جاذب این آزمون تکرار شده است.

پس از انجام آزمایش با استفاده از روابطی که در ادامه می آوریم به تحلیل نتایج می پردازیم. دبی سوخت مصرفی از رابطه 1 محاسبه می شود:

$$\dot{m}_f = (r_f / t_f) \times 50 \times 10^{-6} \quad (1)$$

که در آن r_f جرم مخصوص سوخت بر حسب گرم بر سانتیمتر مکعب معادل 0.83 و t_f زمان مصرف 50 سانتیمتر مکعب سوخت موتور بر حسب ثانیه است. دبی جرمی سوخت بر حسب کیلوگرم بر ثانیه می باشد.

مصرف مخصوص سوخت ترمزی از رابطه 2 به دست می آید:

$$bsfc = [m_f / (C_f \times P_b)] \times 36 \times 10^5 \quad (2)$$

C_f ضریب تصحیح توان که بی بعد است و P_b توان ترمزی بر حسب کیلو وات است.

آلودگی مخصوص دوده سیاه ترمزی S_{soot} بر حسب g/kWh از رابطه 3 محاسبه می شود که در آن \dot{m}_{soot} دبی جرمی دوده بر حسب g/h در هر نقطه از سیزده نقطه تست ECE-R49 و P_b توان ترمزی بر حسب kW در هر نقطه و w_f ضریب وزنی هر نقطه است.

$$S_{soot} = \sum_1^{13} \frac{\dot{m}_{soot}}{P_b} \times w_f \quad (3)$$

\dot{m}_{soot} بر حسب (g/h) نیز از رابطه 4 محاسبه می شود که در آن r_{soot} جرم مخصوص دوده بر حسب (mg / m^3) است و توسط دستگاه دودسنج برداشت می شود و \mathcal{Q}_e دبی حجمی اگزوز بر حسب (m^3 / s) است.

$$\dot{m}_{soot} = r_{soot} \times 10^{-3} \times \mathcal{Q}_e \times 3600 \quad (4)$$

دبی حجمی اگزوز از رابطه 5 محاسبه می شود که در آن \dot{m}_a و \dot{m}_f دبی جرمی سوخت و هوا بوده و r_e دانسیته اگزوز است.

$$\mathcal{Q}_e = \frac{\dot{m}_a + \dot{m}_f}{r_e} \quad (5)$$

دانسیته اگزوز از رابطه 6 محاسبه می شود که در آن r_e فشار اگزوز توسط یک فشار سنج بوردون که در نزدیکی پروب دودسنج نصب شده است اندازه گیری می شود.

$$r_e = \frac{P_e}{0.287 \times (T_e + 273)} \quad (6)$$

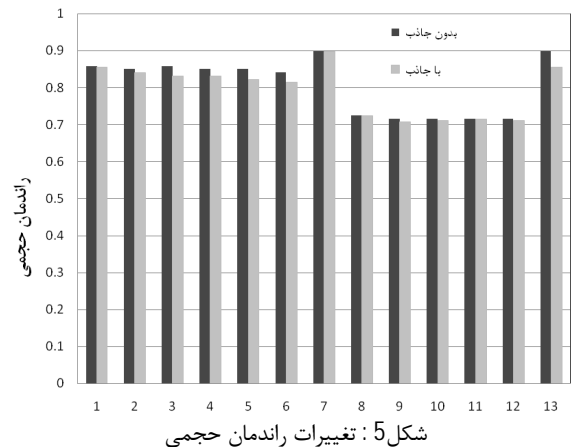
جاذب مرطوب همچون مانعی در مسیر گازهای خروجی آگزوز است و بهمین جهت مصرف مخصوص سوخت ترمزی موتور با جاذب بیشتر از موتور بدون جاذب است (شکل 6) میزان این افزایش ناچیز و حدود 10 درصد است. راندمان حجمی موتور با جاذب کوچکتر از موتور بدون جاذب است (شکل 5)، حداکثر این کاهش حدود 5 درصد است.

موتور تنفس طبیعی OM314 تنفس طبیعی با جاذب استاندارد EURO1 را پوشش می دهد اما استاندارد EURO2 را در بر نمی گیرد.

مراجع:

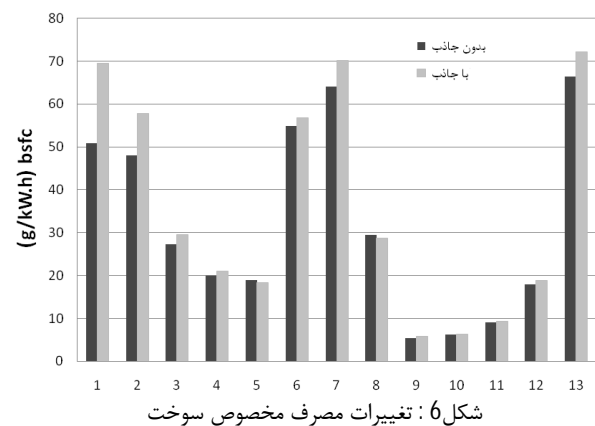
- [1] Heywood JB. "Internal combustion engine fundamentals", New York; McGraw-Hill; 1988
- [2] Nguyen Huu Nhon, Y., Mohamed Magan, H., Petit, C., "Catalytic diesel particulate filter Evaluation of parameters for laboratory studies", Applied Catalysis B: Environmental 49 (2004) 127-133
- [3] Jai-Koo, P., Jay-Hyun, P., Jung-Wook, P., Hong-Seok, K., Young-II, J., "Preparation and characterization of porous cordierite pellets and use as a diesel particulate filter", Separation and Purification Technology 55 (2007) 321-326
- [4] Bogdani, M., Behrendt, F., Mertins, F., "The influence of a 2-component model on the computed regeneration behaviour of an uncoated diesel particulate filter", Chemical Engineering Science 63 (2008) 2601 - 2613
- [5] Hayashi, H., Kubo, S., "Computer simulation study on filtration of soot particles in diesel", Computers and Mathematics with Applications 55 (2008) 1450-1460
- [6] Yamamoto, K., Satake, S., Yamashita, H., "Microstructure and particle-laden flow in diesel particulate filter", International Journal of Thermal Sciences 48 (2009) 303-307
- [7] Zheng, M., Banerjee, S., "Diesel oxidation catalyst and particulate filter modeling in active - Flow configurations", Applied Thermal Engineering 29 (2009) 3021-3035
- [8] M. Ghazikhani, Y. Kashi, M. Tufani, S. I. Mirzadeh, "Experimental investigation on soot reduction in city driving diesel vehicles in comparison with EuroII standard" 5th CICE, 2007

یکی از عمده ترین مزایای این جاذب نسبت به فیلترهای رایج دوده، تأثیر ناچیز آن در افت راندمان حجمی موتور (کاهش پس فشار آگزوز) می باشد. در واقع در این جاذب عدم وجود محیط متخلخل که با افت شدید فشار همراه است موجب ناچیز بودن افت فشار در مسیر آگزوز است. افت فشار آگزوز عمدتاً موجب عدم خروج دود در مرحله هم پوشانی سوپاپها می شود. نمودار زیر نشان دهنده تأثیر ناچیز جاذب بر افت فشار آگزوز است.



تأثیر روی مصرف سوخت مخصوص (bsfc)

چون یکی از چالشهای مهم پیش روی فیلترهای رایج دوده مساله افزایش توان پمپی موتور و بالطبع افزایش مصرف سوخت موتور می باشد، جاذب مرطوب با ایجاد افت فشار ناچیز در مسیر آگزوز موجب تأثیر بسیار کمی بر افزایش مصرف سوخت مخصوص شده است. نمودار ذیل نشان دهنده تأثیر ناچیز جاذب مرطوب بر افزایش مصرف سوخت مخصوص می باشد.



نتیجه گیری و جمع بندی

نصب جاذب مرطوب در مسیر آگزوز باعث کاهش دبی جرمی دوده می شود (شکل 3). این کاهش در گشتاورهای بالاتر به حدود 70 درصد می رسد. چون در گشتاورهای بالاتر سرعت گازهای خروجی آگزوز افزایش می یابد و برخورد دود با آب جاذب افزایش می یابد.