

بررسی فیزیک توربولانس مجاور جدار جامد

مهرزاد طباطبائیان

استادیار دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

بهاره فیروزآبادی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - دانشگاه تربیت مدرس

چکیده:

تحقیقات تجربی درباره جریان مغشوش نزدیک جدار جامد مورد بررسی قرار گرفته است. ایده ساختارهای هماهنگ (Coherent Structure) در ناحیه Buffer و پدیده Burst به طور مفصل مورد بحث قرار گرفته اند. نتایج بدست آمده توسط محققین رابطه نزدیکی بین انرژی جریان مغشوش و وجود پدیده Burst را نشان می دهد. همچنین روشهای مختلف برای کنترل فرکانس Burst و در نتیجه تنش برشی ناشی از توربولانس مورد بحث قرار گرفته است.

Investigation of Physics of Near Solid Wall Turbulence

M. Tabatabaeian, Ph. D.

Assistant Prof. Mech. Eng. Dept. Tarbiat Modares. Univ.

B. Firoz Abadi, M. Sc.
Graduate Student

Mech. Eng. Dept. Tarbiat Modares. Univ.

ABSTRACT

Recent experimental observations about turbulence phenomena near solid wall are reviewed. The idea of coherent structure near wall in the buffer zone and the burst phenomenon are discussed in detail. Experimental results obtained by researchers indicate a close relation between the energy level of turbulence and burst phenomenon. Different method for controlling the frequency of burst and hence the turbulence shear stress are also discussed.

بر خلاف نامگذاری توربولانس که به معنی اغتشاش و بی‌نظمی کامل می‌باشد، از این دیدگاه پدیده‌ای قانونمند بوده و بین حوادث آن ارتباط منطقی برقرار است، به عبارت دیگر بر ساختار آن سامان یافتگی حاکم است. این نظریه به coherent structure (که از این پس اختصاراً C.S. نامیده می‌شود) مشهور شد. گفته شده که C.S. حدود ۵۰٪ تا ۷۰٪ انرژی توربولانس را دربردارد (Fiedler, 1985 b).

توربولانس انواع متفاوتی داشته که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را داراست. در توربولانس محصور (banded) مانند جریان در لوله، کانال و جریان لایه مرزی مغشوش، وجود جدار جامد اثر خاصی بر ساختار توربولانس دارد. توربولانس آزاد مانند free jet و با shear layer نیز متفاوت از نوع قبل می‌باشد. وجه مشترک انواع ذکر شده حرکت گردابه‌ای بوده و به این ترتیب می‌توان از دیدگاه C.S. انواع گردابه‌ها، نحوه اتصال و حرکت آنها را در هر نوع توربولانس مشخص کرد. به گفته اکثر محققان، توربولانس محصور به جدار جامد ساختار بسیار پیچیده‌ای در مقایسه با سایر انواع توربولانس داشته و از ساختارها و یا سازه‌های بیشتری تشکیل شده است. در این مقاله ضمن تعریف C.S. و معرفی ویژگی‌ها و پیامدهای آن، قوانین حاکم بر توربولانس مجاور جدار را بررسی کرده و ارتباط منطقی و سازمان یافته در حوادث این نوع توربولانس را دنبال خواهیم نمود.

۱- تعریف، ویژگی‌های و پیامدها Coherent Structure

مشخصترین ویژگی توربولانس حرکت ذرات سیال به صورت گردابه‌ای است. پارامتر معرف این نوع حرکت، ورتیسیته (vorticity) می‌باشد.

براین اساس C.S. سیستم انتقال و تبادل ورتیسیته تعریف می‌شود. Fiedler (1985a) C.S. را بدینگونه تعریف می‌کند: تشکیل غیر ارادی و خودبخود از سیستمهای متحرک که ورتیسیته مربوط بهم دارند.

ساختار توربولانس از دیدگاه C.S. دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد

الف - این پدیده دو مقیاس داشته (مقیاس بزرگ - large scale و مقیاس کوچک - small scale) و در بسیاری از حالات در مقیاسه با ابعاد جریان از نوع مقیاس بزرگ می‌باشد.

ب - جریان یابنده است، عمری دارد و به عبارت دیگر زمان عبور متوسط دارد.

ج - در ساختار خود وابستگی شدیدی به مقیاس اندازه‌گیری داشته، به طوری که می‌توان گفت نیمه پر بود یک است.

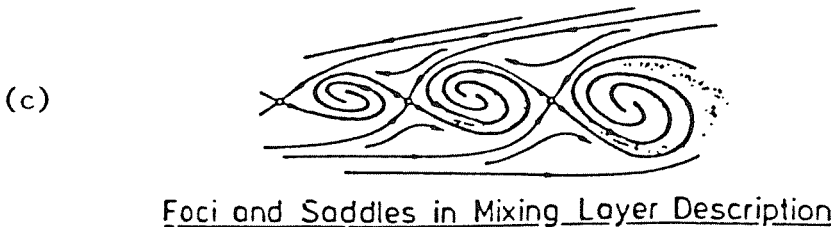
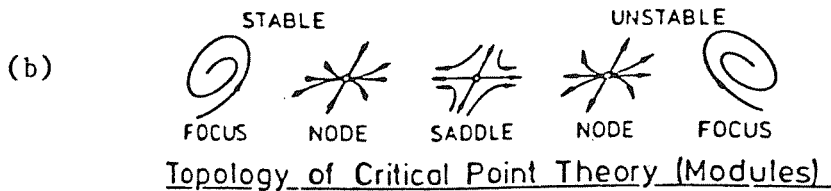
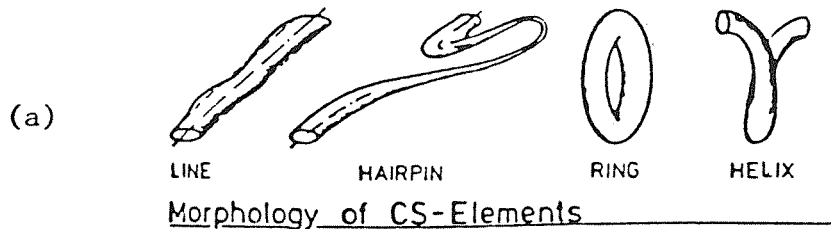
با توجه به مطالب ذکر شده، می‌توان یک جریان را به تعدادی المانهای ساده کوچکتر تقسیم کرد. این المانها در

حرکت ذرات سیال در جریان لایه مرزی مغشوش، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این متن مقالاتی که به طور تجربی توربولانس را مورد آزمایش و مشاهده قرار داده‌اند، مرور و رابطه منطقی، همساز و هماهنگ که بر حوادث و پدیده‌های توربولانس حاکم است، استنتاج شده است.

از زمان انجام آزمایش رینولدز در لوله و مشاهده خط سیر رنگ (خط رگه یا streak line) در این آزمایش، این نظریه رواج یافت که ذرات در جریان مغشوش حرکت کاملاً تصادفی داشته و پدیده‌های توربولانس اتفاقی (stochastic) هستند. با عمومیت یافتن نظریه stochastic در توربولانس، عمده فعالیتها در زمینه تئوری انجام شده و رغبت برای مشاهده جریان چندان زیاد نبود. با متوسط گیری زمانی از معادلات لایه مرزی مغشوش و ظهور ترم تنش رینولدز بیشتر کوششها در جهت مدل نمودن این ترم اختصاص یافت. پس از سالها تلاش تئورسینها، که همچنان ادامه دارد، هنوز مدلی فراگیر که بتواند همه انواع توربولانس را با هر عدد رینولدز در برگیرد، بدست نیامده است. عدم دسترسی به مدلی موفق برای تنش رینولدز و در نتیجه عدم امکان حل معادلات لایه مرزی مغشوش به روش متوسط گیری زمانی، ضعف و ناتوانی این روش را در حل معادلات روشن ساخته است. از طرف دیگر در همه جریانهای مهندسی نیاز به پیش‌بینی تنش برشی و محاسبه نیروی پسا (drag force) وجود دارد. همه این امور باعث شده که درک و شناسایی صحیحی از توربولانس مورد لزوم و نیاز قرار گیرد و فعالیتها در این جهت بویژه از نظر تجربی متمرکز گردد.

از حدود سالهای ۱۹۵۰ و بعد از آن، مشاهده جریان و درک و کشف روابط بین پدیده‌های توربولانس و کشف سامان یافتگی (coherence) و قوانین حاکم بر آن مورد علاقه قرار گرفت، و انتشار مشاهدات و یافته‌ها این علاقه را شدت داد (Fiedler, 1985a).

Townsend (1956) نظر داد که ساختار دوگانه‌ای بر جریان لایه مرزی مغشوش حاکم است. یکی ساختار بزرگ شامل گردابه‌های (eddy) بزرگ که در تعادل انرژی با یکدیگر بوده و دیگری یک زیرساختار که عمده انرژی توربولانس را دربردارد. یک دهه بعد Kline (1967) در باره مشاهده رگه‌های در امتداد جریان و مجاور جدار، در جریان لایه مرزی مغشوش گزارش داد. اما ایده وجود ساختار منطقی، مرتبط و هماهنگ در توربولانس زمانی عمومی شد که Brown & Roshko (1974) مشاهدات خود را در زمینه mixing Layer انتشار دادند. با تأیید و توضیح Bradshaw (1974) این نظریه تصدیق شده و شاخه‌ای جدید در مطالعه توربولانس بوجود آمد.



شکل ۱ المانهای Coherent Structure [Fiedler, 1985 a]

ج - C.S. عامل تنش برشی روی جدار می باشد و تغییر آن باعث تغییر میزان نیروی بالابرنده (lift force) و یا نیروی پسا (drag force) می شود (Stone, 1984; Huerre, 1984).

۲- بررسی سامان یافتگی و قوانین حاکم بر لایه مرزی مجاور جدار جامد

چنانکه در مقدمه آمد، توربولانس محصور شده بوسیله جدار یکی از پیچیده ترین انواع توربولانس بوده و فیزیک

جریانهای توربولانس عمدتاً عبارتند از گرداب سنجاقی (hairpin vortex)، گرداب حلقوی (ring vortex)، گرداب خطی (line vortex) و گرداب مارپیچی (helical vortex)، این گردابها بگونه های مختلف به طوریکه در شکل ۱ نشان داده شده است، در انواع جریان مغشوش قرار می گیرند. در شکل (a, 1) چند نوع گرداب که در انواع جریان توربولانس عمومیت دارند، دیده می شود. در (b) نحوه اتصال گردابها نشان داده شده و (c) نشان دهنده نحوه اتصال گردابها در shear layer است.

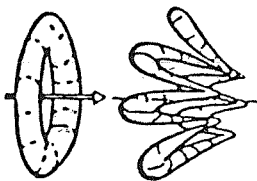
به عنوان مثال در جریان جت آزاد (free jet) عمدتاً گردابهای حلقوی و مارپیچی دیده می شود. شکل ۲ گردابهای جریان جت آزاد را نشان می دهد.

امروزه مشخص شده که C.S. دارای پیامدهایی است. این پیامدها که تاکنون شناخت شده عبارتند از:

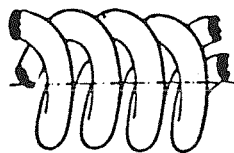
الف - C.S. به عنوان منبع اصلی صدا (flow noise) شناخته شده است. منابع صوتی بستگی زیادی به محل جفت شدن گردابها داشته (Crighton, 1981) و نشان داده شده که توقف و یا انسداد گردابها از میزان صدای منتشره کاسته است (Laufer, 1983a).

ب - اثر C.S. در احتراق و اختلاط که مورد استفاده فرآیندهای شیمیایی است کاملاً شناسایی شده و امروز موضوع اصلی تحقیق در این مبحث را تشکیل می دهد (Eickhoff, 1982).

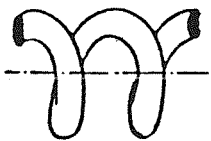
0th Mode (Ring)



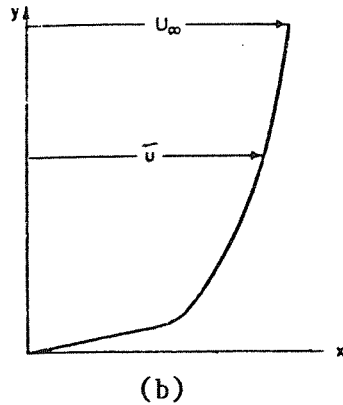
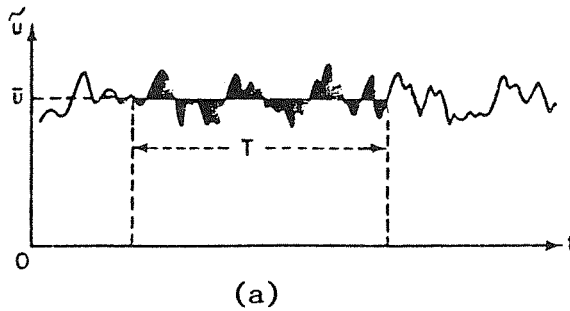
2nd Mode (Double Helix)



1st Mode (Helix)



شکل ۲ گردابهای جریان جت آزاد [Fiedler, 1985 a]



شکل ۳ -a- پروفیل سرعت لحظه‌ای نسبت به زمان در جریان مغشوش
b- متوسط زمانی سرعت نسبت به فاصله از جدار

x_i بردار مکان، t زمان، $\bar{u}(x_i, t)$ سرعت لحظه‌ای، $\bar{U}(x_i)$ مقدار متوسط آن و $u'(x_i, t)$ نوسانات سرعت می‌باشد. این تجزیه اولین بار توسط رینولدز انجام شد (علامت - در بالای متغیرها نشان‌دهنده متوسط آنهاست).

با اعمال این متوسط‌گیری در معادله حرکت ذرات سیال (معادله Navier-Stokes) معادله انتقال \bar{U} به دست آمده و ترمهای تنش رینولدز ظاهر می‌گردد. برای حل معادله مذکور می‌توان از مدل‌های متفاوتی که برای تنش رینولدز ارائه شده، استفاده کرد. چنانکه در مقدمه نیز آمد، این روش متوسط‌گیری اطلاعاتی در باره نوسانات سرعت به دست نداده، و مشخص نمی‌کند که ماکزیمم نوسانات در کجا اتفاق افتاده، و یا پیوند مقیاس بزرگ آن چه می‌باشد. لذا برای بررسی تغییرات در حرکت و سرعت ذرات سیال لازم است، اطلاعات بیشتری از وضعیت نوسانات به دست آید. به همین دلیل از روشهای دیگر متوسط‌گیری استفاده می‌شود.

ب - متد Conditional Averaging

به دلیل تغییرات شدید دامنه و نوسانات سرعت در

مخصوص به خود را دارا می‌باشد. در لایه مرزی مغشوش دیده شده که عمده وقایع و پدیده‌ها نزدیک جدار جامد صورت می‌گیرد. این موضوع با تزریق محلول پلیمر در یک لوله نشان داده شده است. اگر محلول پلیمر از جدار لوله حاوی جریان آب تزریق شود، کاهش تنش برشی سریعاً اتفاق می‌افتد، در حالیکه تزریق به خط محور لوله (center line) باعث تاخیر در کاهش تنش برشی تا زمان رسیدن محلول پلیمر به مجاور جدار شده است (Wells, 1967). لذا در لایه مرزی مجاور جدار لازم است پدیده توربولانس از روی جدار تا فاصله $y^+ = 250$ بررسی شود $y^+ = y u^* / \nu$ ، فاصله از جدار بوده و $u^* = \sqrt{TW/\rho}$ سرعت برشی و ν لزجت سینماتیکی و y^+ فاصله بدون بعد از جدار می‌باشد. همچنین TW تنش برشی روی جدار و ρ جرم مخصوص سیال است). فاصله بدون بعد از جدار تا $y^+ = 10$ زیر لایه لزج (viscous sublayer)، و در فاصله $10 < y^+ < 35$ در ناحیه buffer و از آن پس هسته اغتشاش (turbulent core) قرار دارد.

۱-۲- کمیت‌های مورد بررسی

کمیت‌هایی که برای کشف و درک فیزیک توربولانس نزدیک جدار بررسی شده، عمدتاً سرعت و مولفه‌های آن می‌باشد. کمیت‌های دیگری از قبیل تنش برشی، وریستی و یا ضریب اصطکاک (drag coefficient) معمولاً برای اندازه‌گیریهای کلان (gross) بکار می‌رود. مولفه‌های سرعت استفاده شده عبارتند از: i سرعت طولی یا مولفه سرعت در جهت جریان (streamwise velocity) که در y^+ های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. ii سرعت نرمال یا مولفه سرعت در جهت عمود بر جدار (normal velocity). بدلیل اینکه در آزمایشگاه فقط سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری می‌شود و منحنی سرعت لحظه‌ای به تنهایی نمی‌تواند حوادث را به خوبی نشان دهد، پروفیل آن به روشهای گوناگونی متوسط‌گیری می‌شود. متداولترین روشهای متوسط‌گیری سرعت لحظه‌ای، در ذیل توضیح داده شده است.

الف - روش متوسط زمانی (Time Averaging Method)

در این روش در فاصله زمانی T از سرعت لحظه‌ای متوسط‌گیری می‌شود. این فاصله زمانی بگونه‌ای انتخاب می‌شود که سطح زیر منحنی نوسانات سرعت صفر گردد (شکل ۳). در یک جریان دائم و مغشوش سرعت لحظه‌ای را می‌توان به صورت زیر تجزیه نمود:

$$\bar{u}(x_i, t) = \bar{U}(x_i) + u'(x_i, t) \quad (1)$$

$$\bar{U}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \hat{u}(x_i, t, T) \quad (4)$$

برای بدست آوردن تصویر درست از یک پدیده نوسانی، T باید از مرتبه مقیاس زمانی پدیده در حالت دائم باشد. از این روش برای بزرگنمایی شدت موضعی انرژی توربولانس استفاده می‌شود. در این رابطه متغیر Variance انرژی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{var}(x_i, t, T) = \hat{u}^2(x_i, t, T) - [\hat{u}(x_i, t, T)]^2 \quad (5)$$

متغیر Var در شکل (4) برای منحنی سرعت لحظه‌ای u(t) نشان داده شده است. می‌توان نشان داد که در چه مکانی Var حداکثر و ماکزیمم خود را دارد. تابع دیگری بنام D(t) به این صورت تعریف می‌شود: در زمانهایی که Var حداکثر خود را دارد، D(t)=1 و در سایر زمانها صفر است:

$$D(t) = \begin{cases} 1 & \text{If Var} > k.u_{r.m.s.} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

K میزان threshold بوده که بسته به آن مقادیر Var بزرگنمایی می‌شود. $u_{r.m.s.}$ متوسط جذر مربع سرعتهاست.

$$u_{r.m.s.}^2 = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2} \quad (7)$$

تابع D(t) که به آن تابع کشف (detection function)

توربولانس، لازم است متوسط‌گیری بگونه‌ای انجام شود که تغییرات در مقیاس بزرگ (large-scale) نمایانده شود. روش متوسط‌گیری conditional بر همین اساس به صورت زیر تعریف می‌شود:

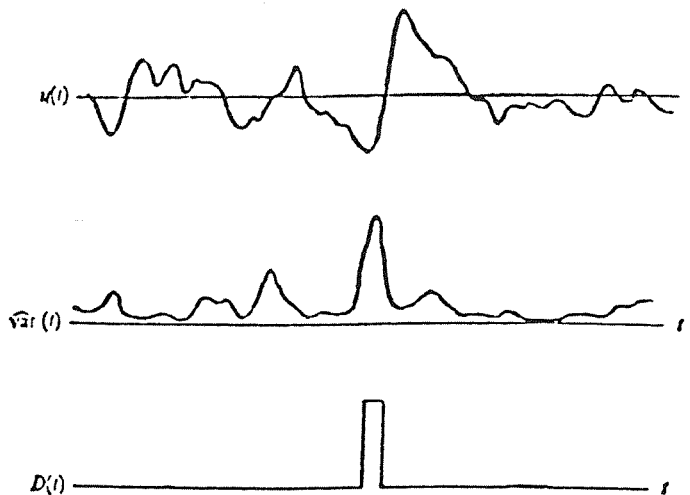
$$\langle u(x_i, t) \rangle = (1/n) = \sum_{j=1}^n \bar{u}(x_i, t_j + T) \quad (2)$$

متغیر مستقل x_i نشان‌دهنده موقعیت پدیده در فضای نمونه بوده و T زمانهایی است که موقعیت بررسی می‌شود. n تعداد دفعاتی است که متغیر u اندازه‌گیری شده است (Blackwelder, 1976). در این روش پدیده در یک فاصله زمانی T اندازه‌گیری می‌شود و با انتخاب T مناسب از مرتبه مقیاس زمانی پدیده (time scale) می‌توان مطمئن شد که تغییرات مورد نظر در فاصله زمانی انتخاب شده صورت می‌پذیرد. به این ترتیب این روش در بررسی سرعت مانند فیلتری عمل کرده و نوسانات کوچک را حذف می‌کند.

ج - متد Variable Interval Time Averaging (VITA) در این روش اگر مولفه نوسانی سرعت $\bar{u}(x_i, t)$ باشد، متوسط آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{u}(x_i, t, T) = (1/T) \int_{t-T/2}^{t+T/2} \bar{u}(x_i, t) dt \quad (3)$$

T فاصله زمانی است که از متغیر در آن فاصله متوسط گرفته می‌شود. اگر T زیاد شود، این روش با روش متوسط زمانی (Time Averaging) یکسان خواهد بود.



شکل ۴ - پروسه کشف در زمانهایی که ماکزیمم انرژی توربولانس رخ می‌دهد (Blackwelder, 1976)

گفته می‌شود مانند فیلتری برای Var عمل می‌کند. در نتیجه می‌توان زمانهایی که اهمیت زیادی دارند (مانند زمانهایی که حداکثر انرژی توربولانس رخ می‌دهد)، بزرگنمایی کرده و از این فیلتر گذراند (نقاطی که $D(t)=1$ و زمانهایی که اهمیت کمتری دارند، پشت فیلتر باقی می‌مانند (زمانهایی که $D(t)=0$). شکل (۴) یک نمونه از تغییرات سرعت لحظه‌ای، $Var(t)$ و تابع کشف را نشان داده است (Blackwelder, 1976).

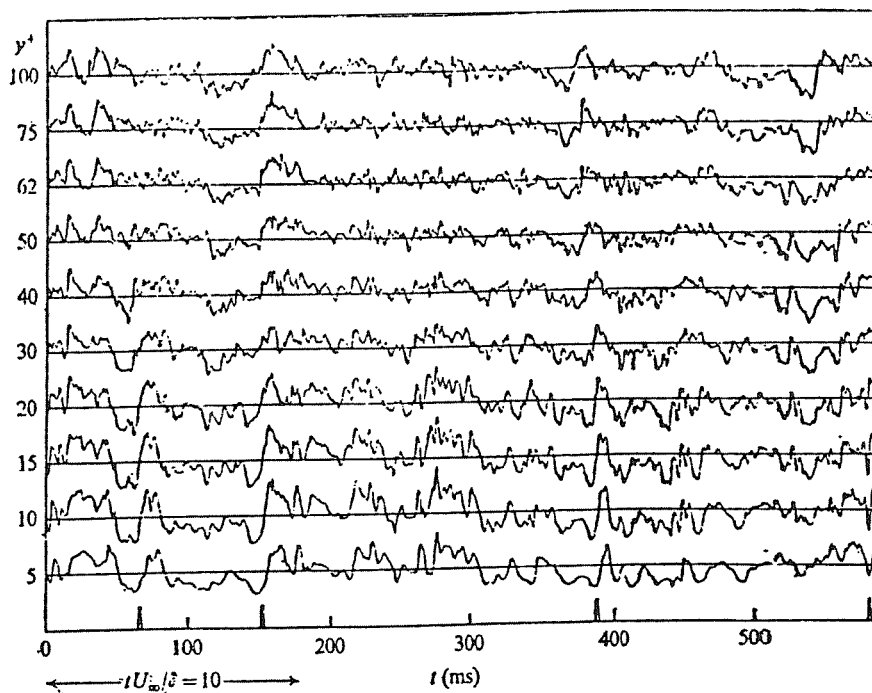
در این مقاله از تابع کشف در $y+=15$ استفاده شده است. این امر بدین دلیل است که انرژی توربولانس ذرات سیال در $y+=15$ ، به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. به همین دلیل $y+=15$ مرجعی برای تغییرات در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۲-۱- بررسی مولفه‌های سرعت در جریان لایه مرزی مغشوش (Streamwise Velocity)

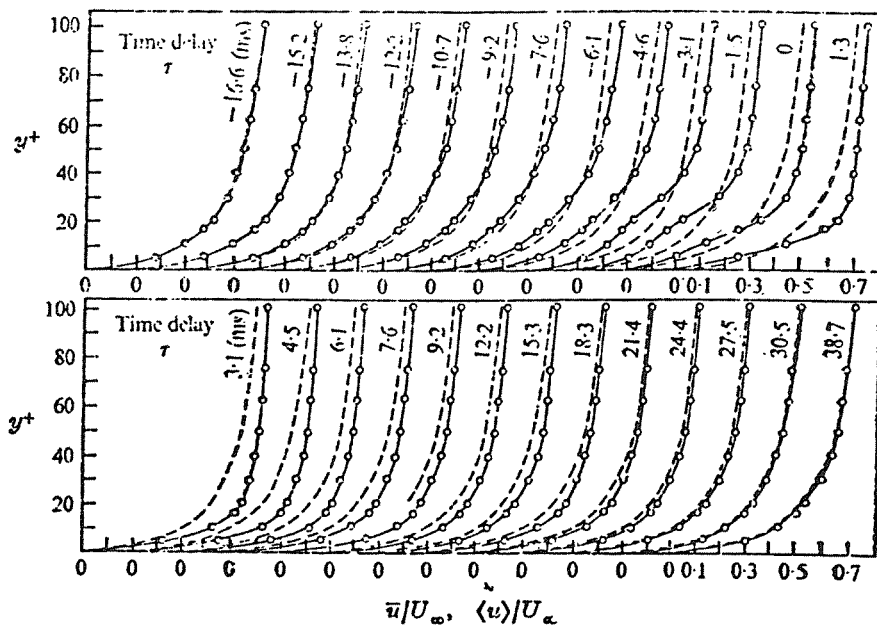
ابتدا نتایج اندازه‌گیری مولفه سرعت لحظه‌ای در جهت جریان بررسی می‌شود. این بررسی کمک می‌کند تا از نظر کلی بتوان دیدگاههایی در باره فیزیک توربولانس بدست آورد. شکل (۵) مولفه طولی سرعت لحظه‌ای را در $y+$ مختلف و نسبت به زمان نشان می‌دهد. نقاطی که در محور زمان علامت زده شده است، زمانهایی است که در $y+=15$ تابع کشف $D(t)=1$

می‌باشد. بدین ترتیب زمانهای مزبور دارای حداکثر انرژی توربولانس می‌باشند. آنچه از شکل مشاهده می‌شود این است که اولاً در جهت ازدیاد $y+$ ، correlation قوی وجود دارد. این بدان معنی است که اغتشاشات در جهت نرمال به سرعت نفوذ می‌کند. ثانیاً هرچه از جدار دور شویم از شدت نوسانات کاسته می‌شود. از طرف دیگر در نواحی نزدیک جدار بعضی وقایع تکرار می‌شود. این وقایع می‌تواند شامل نقاطی باشد که $D(t)=1$ است.

اگر از منحنی شکل (۵) متوسط‌گیری شود، نتایج بیشتری بدست می‌آید. این نتایج در شکل (۶) دیده می‌شود. شکل (۶) مولفه طولی سرعت را با دو نوع متوسط‌گیری زمانی و conditional به‌عنوان تابعی از جهت نرمال و در زمانهای مختلف نشان می‌دهد. زمان صفر متعلق به مکانی است که در $y+=15$ تابع $D(t)=1$ شده باشد. $16/6ms$ قبل از این نقطه ($time\ delay = -16.6ms$)، دو پروفیل متوسط زمانی و متوسط conditional برهم منطبق شده‌اند. این امر بدان معنی است که متوسط نوسانات در پرپود زمانی t صفر است. از این زمان به بعد دو منحنی از هم فاصله می‌گیرند. در نواحی دورتر از جدار ($y+=80-100$) نوسانات سرعت افزایش یافته و پروفیل متوسط conditional از متوسط زمانی جلو می‌افتد. این افزایش



شکل ۵ مولفه طولی سرعت نسبت به زمانهای مختلف و در $y+$ مختلف (Blackwelder, 1976)



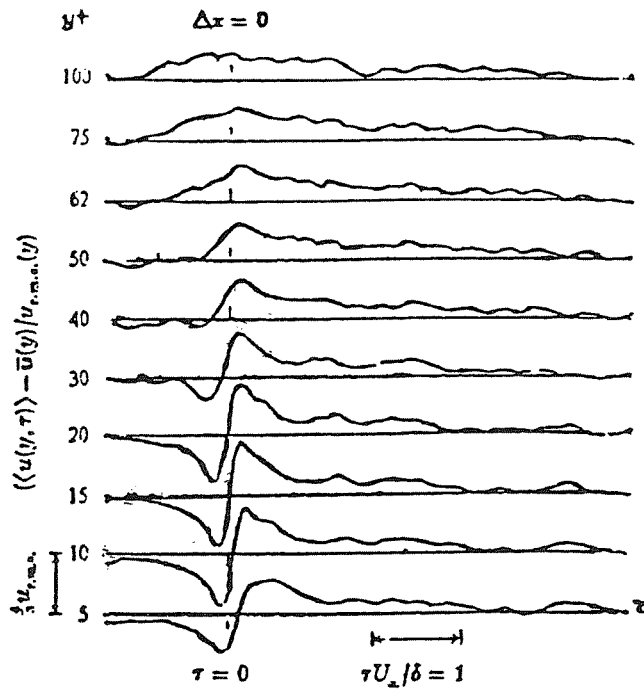
شکل ۶ - - - - - متوسط زمانی مؤلفه طولی سرعت و - - - - - متوسط Conditional زمان صفر متعلق به مکانی است که تابع کشف $D(t)=1$ در $y+=15$ می باشد، (Blackwelder, 1976)

این منحنی تغییرات نوسانات سرعت (شتاب) را مشخص تر نشان می دهد. دیده می شود که ماکزیمم شتاب (شیب تغییرات) در $y+=15-20$ اتفاق می افتد و نیز شتاب نواحی نزدیک جدار بسیار زیادتر از نواحی دورتر از جدار است. در ناحیه زیر لایه لزوج ($y+ < 10$) و ناحیه buffer شتاب قویتر تقریباً در یک زمان اتفاق می افتد و correlation در زمان سریعتی صورت می گیرد. در نواحی دور از جدار ($y+ > 50$) تمایل به یکنواختی شتاب کاملاً مشهود است. نکته دیگری که از شکل مشاهده می شود اینست که قبل از detection تا $y+=40$ سرعت کمتر از سرعت متوسط (نوسانات منفی) است. در حالی که در ناحیه بالای آن ($y+ > 40$) نوسانات سرعت مثبت است. بعد از detection در تمام نواحی و در $y+$ های مختلف، نوسانات سرعت مثبت و مونتوم اضافی وجود دارد. این امر در شکل (۶) نیز دیده و ذکر شده بود.

۲-۲-۲- مولفه نرمال سرعت

شکل (۸) مولفه نرمال سرعت در $y+$ مختلف دیده می شود. قبل از detection فقط در $y+=15$ مولفه سرعت نرمال، مثبت و بعد از آن همه جا منفی است. این بدان معنی است که بعد از $y+=15$ همه جا ذرات سیال به سمت پایین و در جهت نزدیک شدن به جدار حرکت می کنند. از شکل (۸) مشاهده می شود که مولفه نرمال سرعت هم در $y+=15$ ماکزیمم شتاب را دارا است.

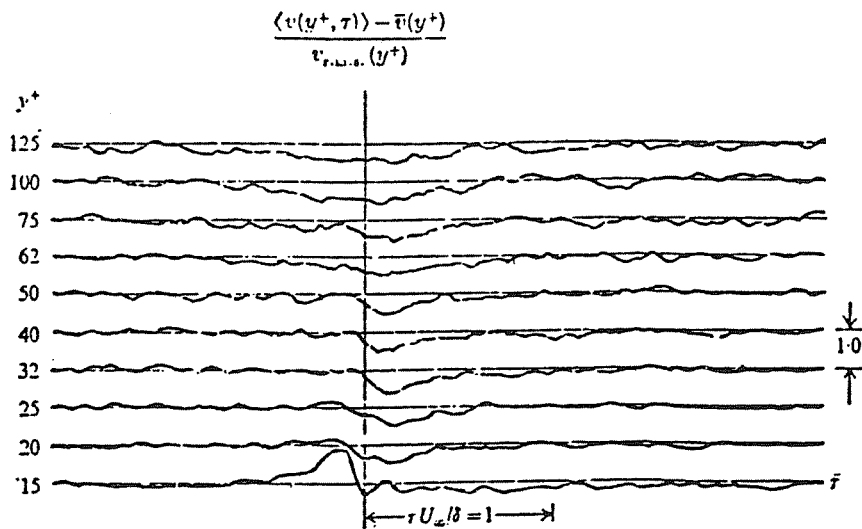
مونتوم در تمام طول پرپود (تا انطباق بعدی) ادامه دارد. در ناحیه پایین و نزدیک جدار (زیر $y+=30$) رفته رفته پروفیل سرعت متوسط از متوسط conditional جلو می افتد (زمان $9/2$ ms). بدین ترتیب پروفیل متوسط conditional سرعت، که نشان دهنده متوسط نوسانات است، تغییرات متعددی می پذیرد و در ناحیه زمان صفر دارای نقطه عطف می شود. از آن پس نوسانات نزدیک جدار افزایش مونتوم یافته و از پروفیل متوسط زمانی زیادتر می شود. این اختلاف رفته رفته کم شده و در زمان $38/7$ ms دو پروفیل مجدداً برهم منطبق می شود. از اینجا روشن می شود که چرا $y+=15$ به عنوان مرجعی برای تابع کشف $D(t)$ انتخاب شده است. زیرا پروفیل سرعت conditional ماکزیمم شیب را در این ناحیه پیدا می نماید (به عبارت دیگر ماکزیمم شتاب سیال و یا ماکزیمم تغییرات انرژی توربولانس). آنچه از این مقایسه نتیجه می شود اینست که واقعه ای پرپود یک بازمان پرپود حدود 55 ms در نزدیک جدار اتفاق می افتد. انحنای زیاد پروفیل سرعت conditional و Klinel (1967) به عنوان چهره مشخصه ای از توربولانس مجاور جدار بنام انفجار (Burst) نامید. این پروسه از نظر زمانی ۲۵٪ زمان توربولانس را در برمی گیرد. نتایج ارائه شده در شکل (۶) بگونه دیگری در شکل (۷) نشان داده شده است. شکل (۷) تفاوت دو منحنی متوسط زمانی و conditional را در زمانهای مختلف نسبت به $y+$ نشان می دهد. $\Delta x=0$ نقطه ایست که در $y+=15$ تابع کشف $D(t)=1$ می باشد.



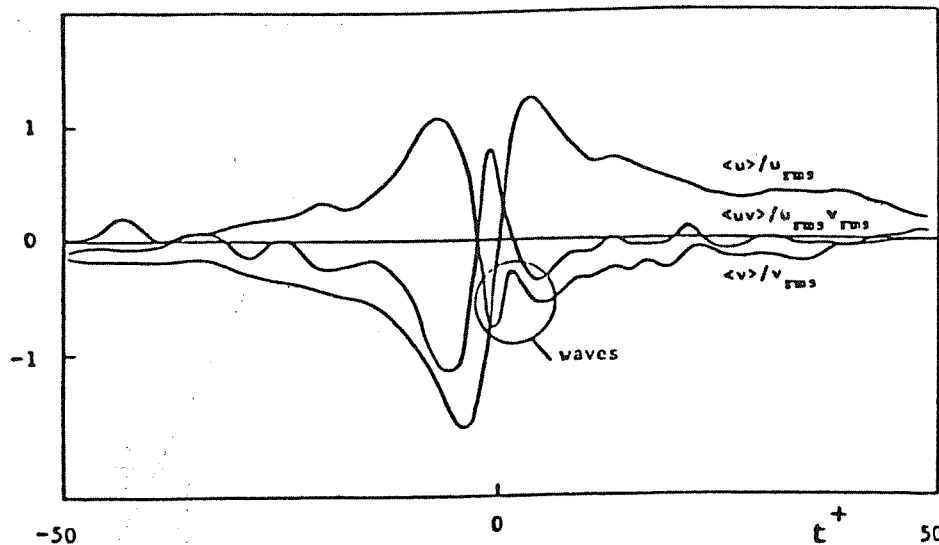
شکل ۷ تفاوت دو پروفیل سرعت متوسط زمانی و متوسط Conditional در y^+ مختلف (Blackwelder, 1976)

متوسط گیری از آنها دیده می شود، ایست که در نزدیک جدار حرکت گردابه ای قوی وجود داشته و این گردابه ها به نحوی در هم اثر می گذارند که سیال را به سمت دور از جدار پرتاب می کنند. به عبارت دیگر در $y^+=15$ حرکتی کاملاً ناگهانی و شبیه انفجار

به این ترتیب می توان گفت ماکزیمم تغییرات تنش رینولدز $\langle uv \rangle$ هم در $y^+=15$ اتفاق می افتد که در شکل (۹) آورده شده است. آنچه در نهایت از تجزیه و تحلیل منحنی های سرعت و



شکل ۸ مؤلفه نرمال سرعت به صورت نرمالیز شده در y^+ مختلف (Blackwelder, 1976)



شکل ۹ مقایسه سرعت‌های نرمال و طولی و تنش رینولدز $\langle uv \rangle$ به صورت نرمالیز شده در $y^+ = 15$ (Johansson, 1985)

مناسب، شبیه‌سازی کرده و به کمک آن شاید بتوان معادلات لایه مرزی مغشوش را توضیح داد. در ادامه به توضیح ویژگی‌های burst می‌پردازیم:

الف - پرپود Burst: مطرح شده که پرپود burst همان پرپود برآمدگی‌های ناحیه خارجی است (Laufer, 1971b). اما بنظر می‌رسد که پرپود burst تابعی از متغیرهای خارجی باشد (Kim, 1971).

در شکل (۱۰) تغییرات پرپود burst نسبت به سرعت برشی نشان داده شده است. دیده می‌شود که هرچه سرعت برشی و به عبارت دیگر تنش برشی بیشتر باشد پرپود burst کمتر می‌شود. از اینجا بر می‌آید که پرپود burst و توربولانس رابطه عکس دارند، هرچه تعداد burst در واحد زمان بیشتر باشد، موجب افزایش توربولانس می‌شود. این مطلب را می‌توان از منحنی شکل (۱۱) مشاهده نمود.

در شکل (۱۱) تعداد burst در واحد زمان (sec.) در واحد طول (cm) اندازه‌گیری شده و نسبت به سرعت برشی رسم شده است که با افزایش سرعت برشی (یا افزایش تنش برشی جدار) افزایش می‌یابد. این موضوع که از منحنی قبل نیز مشاهده می‌شود، نشان دهنده تأثیر burst در میزان توربولانس است.

ب - گفته شده که burst رشته واقیعی است که سیال را از جدار به بیرون پرتاب می‌کند (Coles, 1987): توضیح ساختار فیزیکی سیال در طول burst مشکل است. زیرا کمیت‌های مختلفی با اندازه‌ها و شدت‌های مختلف در پروسه آن شرکت دارند. شکل (۱۲) مراحل آن را نشان می‌دهد. Kline (1967) سه مرحله برای burst مشخص نموده است:

رخ می‌دهد که burst نامیده می‌شود. در بخش‌های ذیل با این پروسه بیشتر آشنا می‌شویم.

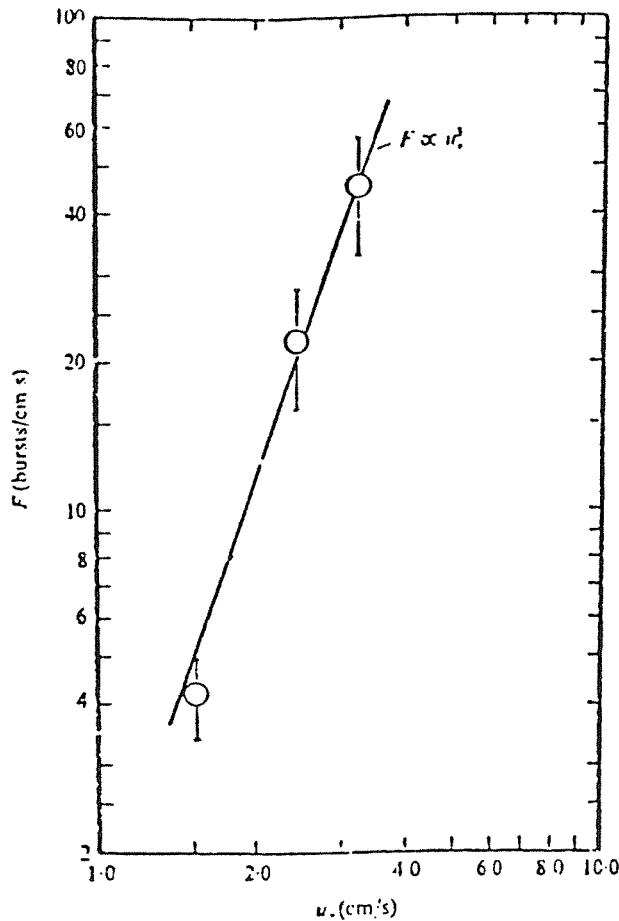
۳-۲- پدیده Burst

آنچه از منحنی‌های مولفه‌های طولی و نرمال سرعت دیده می‌شود اینست که رگه‌های بالا با سرعت زیادتر به سمت پایین آمده و جریان ناگهان گردابی می‌شود و بدینوسیله سیال با مومنتوم کمتر به سمت دور از جدار پرتاب می‌شود.

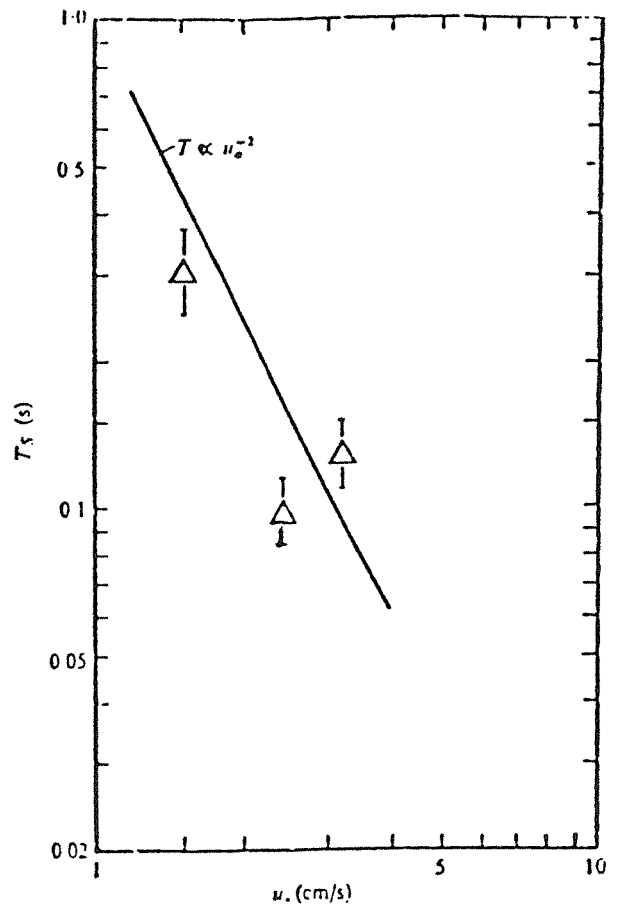
Kline (1967) burst را بدینگونه تشریح کرده است: در ناحیه نزدیک جدار رگه‌ها نوسانی شده و بر حسب تصادف یکی از این رگه‌ها که مومنتوم کمتری دارد به سمت بالا رفته و در اندر کنش با ناحیه خارجی (outer region) قرار می‌گیرد. عمده تولید توربولانس در این پروسه اتفاق می‌افتد. باید گفت اگرچه این پروسه از نظر زمانی % ۲۵-۱۸ زمان توربولانس را دربر می‌گیرد، اما مطرح شده که بین % ۷۰-۵۰ تولید توربولانس را به عهده دارد (Blackwelder, 1976; Corino, 1969).

اینکه منشاء burst چیست و آیا رگه‌های با مومنتوم بیشتر ابتدا به سمت پایین می‌آیند و سیال با مومنتوم کمتر را به بالا می‌رانند و یا اینکه رگه‌های با مومنتوم کمتر ابتدا به بالا می‌روند، سوالی است که پاسخ آن هنوز روشن نیست. مفهوم این امر اینست که هنوز روشن نشده که آیا burst گسترش توربولانس را در ناحیه خارجی به عهده دارد و یا ناحیه خارجی، burst را می‌سازد و یا اینکه این دو مکانیزم اندر کنش دارند (Lu, 1973).

آنچه مسلم است وجود burst می‌باشد. حال با آینده است که این پروسه را با یک مدل تئوریک و با مقیاس طول و زمان



شکل ۱۱ تعداد burst (F) در واحد زمان و طول نسبت به سرعت برشی (Achia, 1977)



شکل ۱۰ تغییرات پریود burst نسبت به سرعت برشی (Achia, 1977)

توربولانس نزدیک جدار و تعداد حوادث در آن، مدل نمودن این نوع جریان هنوز در حد تئوری و نظریه باقی مانده است. بعضی از نظریه‌ها در زیر آورده می‌شود:

Kline (1967) پس از آزمایشات متعدد چنین اظهار نظر نمود که حرکت و اندرکنش سیال در نواحی داخلی و خارجی باعث ایجاد گردابه‌های خلاف جهت در جهات طولی و عرضی می‌شود، همچنین کوچک شدن گردابه‌ها در نزدیک جدار باعث هدایت وریستی ثانویه در جهت جریان و رشد ناپایداری زیر لایه می‌گردد.

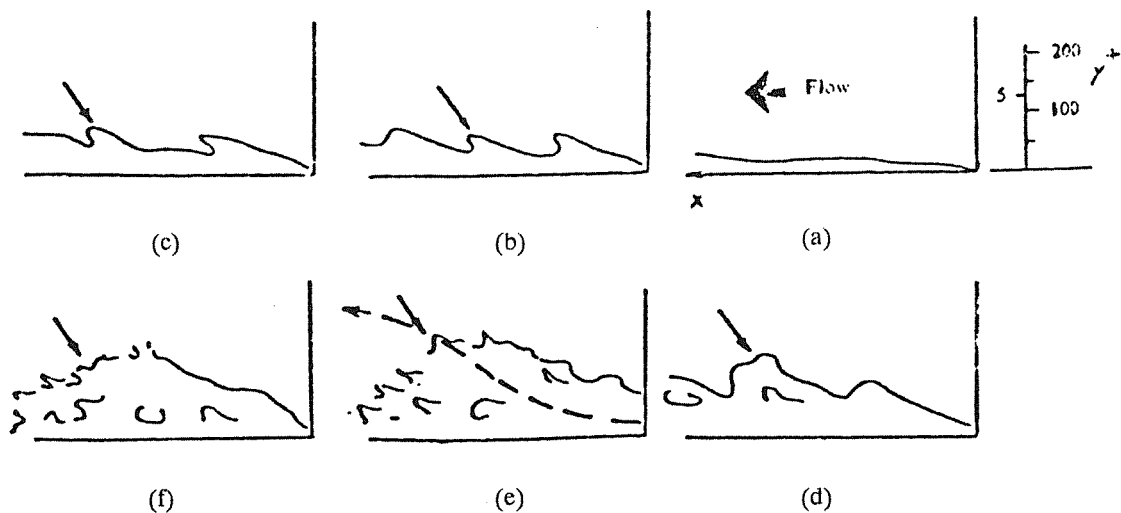
Coles (1987) معتقد است که لایه برشی یا احتمالاً نوار برشی در بالای رگه‌های کم سرعت به وجود می‌آید. این لایه ممکن است تحت ناپایداری Kelvin-Helmholts قرار گرفته، نوسانی گردد (در $y+ = 15$). این نوسانات جوهره burst است. خاصیتی از زیر لایه که از این پدیده بوجود می‌آید، وریستی عمود بر جریان است که در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

- (i) بالا رفتن رگه (lift up)
- (ii) نوسانی شدن رگه (oscillatory motion)
- (iii) پاشیده شدن آن (break down)

بین این مراحل فاصله زمانی و مکانی مشخصی وجود ندارد. در عکسهای شکل (۱۲) در (b) رگه از جدار جدا شده و به بالا رفته است. رگه بالا رفته سریعاً نوسانی شده و به $y+ = 150$ می‌رسد (c). پاشیده شدن المان سیال در (d) اتفاق می‌افتد. در (e) سیال پاشیده شده با ناحیه خارجی کاملاً مخلوط شده و حرکت قوی چرخان در ساختار burst تا $y+ = 250$ دیده می‌شود.

۴-۲- توضیح Burst از دیدگاه C.S.

پس از توضیح فیزیک وقایعی که در توربولانس مجاور جدار (لایه مرزی مغشوش) اتفاق می‌افتد، باید گردابه‌ها و حرکت وریستی را در جهت تعیین ساختار C.S. روشن نمود. لازم به توضیح است که به دلیل پیچیدگی ساختار

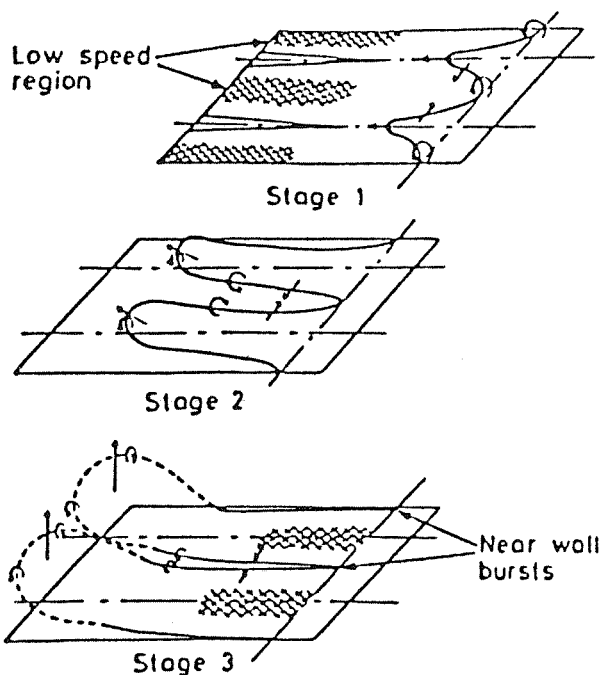


شکل ۱۲ مراحل burst در جریان آب :
(Achia, 1977) $y^+ = 100 = 0.55 \text{ cm}$, $t = 0.16 \text{ sec}$

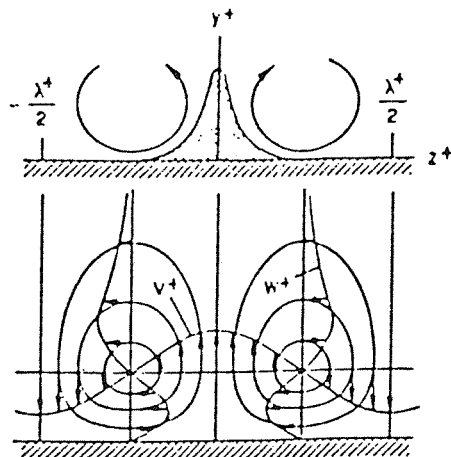
می دهد و حرکت گردابه ها را تا حدی مشخص نموده است. اینک تئوری وجود گردابه های چرخان خلاف جهت تا چه حد منطبق با واقعیت است، کاملاً تأیید نشده، اما همواره شواهد و قرائنی وجود دارد که این ایده را تقویت می نماید. از جمله شواهد وجود لایه برشی در لایه مرزی مغشوش مجاور جدار

در این رابطه Choi (1985) از مشاهده جریان دریافت که یک جفت ورتکس چرخان خلاف جهت بسیار نزدیک زیر لایه وجود دارد. Choi معتقد است که burst بین دو جفت گردابه اتفاق می افتد. شکل (۱۴) مدل پیشنهادی Choi را نشان می دهد. همچنین بر اساس نظریات Kline (1967) مدل شکل (۱۵) توسط fiedler پیشنهاد شده است.

شکل (۱۵-a) تصویر از روبه رو است. دیده می شود که رگه های پایین (که سرعت کمتری دارند) توسط گردابه ها به سمت دور از جدار رانده می شوند. در قسمت (b) تصویر از بالا را نشان



شکل ۱۴ مدل پیشنهادی Choi جهت ایجاد گردابه ها در لایه مرزی مغشوش (Choi, 1985)

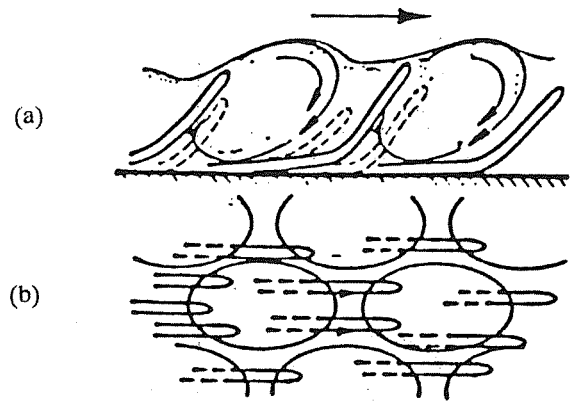


شکل ۱۳ تصویر شماتیک از گردابه های نزدیک جدار لایه مرزی مغشوش. تصویر بالا، تصویر در جهت جریان. تصویر پایین، پروفیل سرعت گردابه های نزدیک جدار (Coles, 1987)

خلاصه کرد: در ناحیه نزدیک جدار ساختاری وجود دارد که مسئول تولید بخش عمده‌ای از توربولانس است. این ساختار را می‌توان برحسب نیاز کنترل کرده، تغییر داد. با توجه به اینکه C.S. مسئول عمده تولید تنش برشی است با اصلاح آن می‌توان تنش برشی را کاهش داد. از طرف دیگر در فرآیندهای شیمیایی که حداکثر توربولانس جهت اختلاط و امتزاج مورد نیاز است، می‌توان C.S. را در جهت تهیج و افزایش ساختار آن تغییر داد. در زمینه کاهش تنش برشی در چند دهه اخیر تحقیقات فراوانی انجام شده است. این فعالیت که بیشتر مورد علاقه شاخه هوا-فضا، می‌باشد، تحت عنوان کاهش اصطکاک پوسته‌ای به روشهای گوناگونی بررسی و آزمایش شده است. آزمایشات نشان داده است که با افزودن مواد ریز (حدود $50 \mu\text{m}$)، توربولانس به میزان قابل توجهی میرا شده است. مواد آزمایش شده شامل محلول انواع پلیمر، ذرات جامد از قبیل پودرسنگ، خاک رس، ذرات لای، ذغال و حبابهای گاز مانند هوا و هیدروژن می‌باشد و کاهش تنش برشی در همه موارد فوق گزارش شده است (برای نمونه به Patterson, 1969, Tiederman, 1987, Madavan, 1985 مراجعه کنید). اینکه دقیقاً طبق چه مکانیزمی کاهش تنش برشی رخ می‌دهد، مشخص نیست. اما فرضیاتی وجود دارد که در ارتباط مستقیم با ساختار توربولانس می‌باشد. به عنوان مثال نتایج زیر از مقایسه دو جریان آب خالص و آب حاوی محلول پلیمر بدست آمده است:

- الف - تعداد burst در واحد زمان و مکان در جریان با تزریق پلیمر در مقایسه با جریان بدون تزریق کاهش یافته است.
- ب - عمر burst در جریان با تزریق پلیمر در مقایسه با جریان بدون تزریق زیاد شده است.
- ج - پررود burst در جریان حاوی پلیمر افزایش یافته است.
- د - اثر انفجار burst در جریان محلول پلیمر تا $y+ \approx 100$ کمتری نفوذ کرده است (حدوداً تا $y+ = 100$)، در مقایسه با جریان آب خالص که نفوذ آن تا $y+ = 250$ بسوده است (Johansson, 1977).

جهت شناختن مکانیزم عمل ذرات جامد، حبابهای گاز و محلول پلیمر تحقیقات بیشتر در باره توربولانس و نیز رفتار مواد

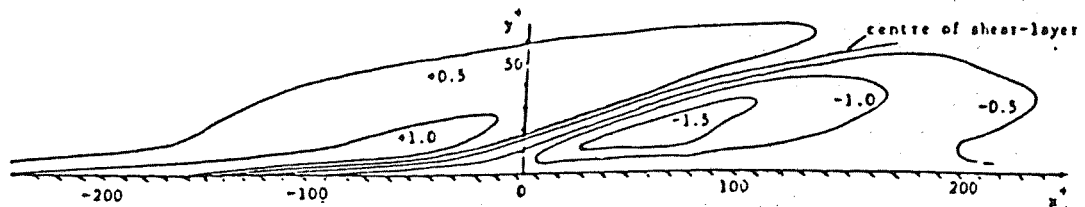


شکل ۱۵ مدل پیشنهادی Fiedler (1985 a) از حرکت گردابه‌ها برای جریان لایه مرزی مغشوش

است. آزمایشات نشان می‌دهد که لایه‌ای وجود دارد که از نزدیک جدار شروع و تا $y+ = 60$ امتداد دارد. روی این لایه حداکثر برش موجود بوده و زاویه مایلی حدود 22° درجه با جدار می‌سازد. شکل (۲۲) خطوط هم سرعت (velocity contour) را در لایه مرزی مغشوش نشان می‌دهد. لایه برشی بین دو contour با سرعتهای متفاوت، به وجود می‌آید (Johansson, 1985).

با مشاهده شکل (۱۶) و تصویری که خطوط هم سرعت می‌سازند می‌توان گفت که ایده گردابه‌های چرخان خلاف جهت تقویت می‌شود. در نهایت می‌توان گفت که ایده‌ها و تئوریهای موجود از وضعیت C.S. در لایه مرزی مجاور جدار هنوز قطعیت نداشته و در حال حاضر، عمدتاً به حل عددی مدلها پرداخته می‌شود. اینکه آیا مدلها و تئوریها تا چه حد با واقعیت منطبق هستند، مسأله‌ای است که آینده نشان خواهد داد. شاید با حل این مدلها و ورودشان به معادلات حرکت، گرهی از مسأله توربولانس که تاکنون لاینحل باقیمانده، گشوده شود.

۳- کنترل Coherent Structure در ناحیه جدار آنچه به عنوان C.S. در ناحیه جدار مطرح شد، می‌توان چنین



شکل ۱۶ خطوط هم سرعت نسبت به محورهای طولی و نرمال بودن بعد، در شکل لایه برشی دیده می‌شود (Johansson, 1985)

در جریان مغشوش لازم می‌باشد (راد و همکاران، ۱۳۷۰).

۴- نتیجه‌گیری

مبحث توربولانس از عمده‌ترین مسائل در مکانیک سیالات بوده و به دلیل ارتباط مستقیمی که با مصرف انرژی دارد، مورد تحقیقات فراوان قرار گرفته و می‌گیرد، عدم امکان حل معادلات حرکت در این نوع جریان، فعالیتها را به سمت مشاهده و شناخت تجربی آن سوق داده است. مشاهدات مکرر نشان داده که برخلاف نظرات ابتدایی بررسی توربولانس، که آنرا تصادف محض می‌دانستند، پدیده‌ای قانونمند بوده و حوادثی هماهنگ، پررودیک و دارای ارتباط منطقی (coherence) در آن دیده شده است. به این ترتیب می‌توان فرآیندهایی در توربولانس مجاور جدار جامد نیز بررسی و دنبال کرد. چهره مشخص این

حوادث پدیده‌ای بنام burst می‌باشد. در فاصله‌ای بسیار نزدیک مجاور جدار جامد ($y+=10$) رگه‌ها ابتدا به سمت بالا می‌روند (lift up)، سپس نوسانی شده (oscillatory motion) و نهایتاً از هم می‌پاشند (breake down). در این پروسه که ذرات سیال بیشترین شتاب را دارا هستند، اغتشاش زیادی در جریان ایجاد شده و منشاء توربولانس مجاور جدار می‌باشد. به همین دلیل اکثر تحقیقاتی که در فیزیک توربولانس انجام می‌شود به مطالعه در پدیده burst، افزایش و کاهش نرخ آن اختصاص یافته است. افزایش توربولانس و کمک آن به اختلاط و احتراق (mixing & combustion) و نیز کاهش شدت آن که در جهت کاهش تنش برشی و یا کاهش نیروی پسا (drag reduction) صورت می‌گیرد، ارتباط نزدیکی با تغییرات burst دارد.

مراجع:

- 1- Achia, B.O.; Thompson, D.W.; *J. Fluid Mech.*, 81,3,493,1977.
 - 2- Blackwelder, R.F.; Kaplan, R.E., *J. Fluid Mech.*, 76,1,89-112, 1976.
 - 3- Bradshaw, P., *Nature*, 249, 1335, 1974.
 - 4- Brown, C.L.; Roshko, A., *J Fluid Mech.*, 64,4,75,1979.
 - 5- Choi, K.S., *Advance in Turbulence*, ed. Comte-Bellot, G. & Mathieu, J., Springer-Verlag, 1987.
 - 6- Coles, D., *Prespectives in Turbulente studies*, Meier, H.U., Bradshaw, P. eds., Springer-Verlag, 1987.
 - 7- Corino, E.R.; Brodkey, R.S., *J Fluid Mech.*, 37,1,1969.
 - 8- Crighton, D., G., *In Lecture Notes in Physics 136*, ed. Jimenes, J., Springer-Verlag, 1981.
 - 9- Eickhoff, H., *Prog. Energy Combust. Sci.*, 8,159,1982.
 - 10- Fiedler, H.E., "Coherent Structure", *Advances in Turbulence*, ed. Mathieu, J., Springer-Verlag, 1987a.
 - 11- Fiedler, H.; Mensing, P. *J. Fluid Mech.*, 150,281,1985b.
 - 12- Huerre, P.; HO, C.M., *Ann. Rer. Fluid Mech.*, 16,365,1984.
 - 13- Johansson, A.V.; Alfredson, P.H.; Eckelmann, H., *Advances in Turbulence*, ed. Comte-Bellot, G. & Mathieu, J., Springer-Verlag, 1987.
 - 14- Kim, H.T.; Kline, S.J.; Reynolds, W.C., *J. Fluid Mech.*, 50,493,1971.
 - 15- Kline, S.J.; Reynolds, W.C.; Schraub, F.A.; Rundstadler, P.W. *J. Fluid Mech.*, 30,4,741,1967.
 - 16- Laufer, J.; Ta-chun, Y., *J. Fluid Mech.*, 134,1,1983 a.
 - 17- Laufer, J.; Badri Narayanan, M.A., *Phys. Fluids*, 14,182,1971b.
 - 18- LU, S. S.; Willmarth, W.W., *J. Fluid Mech.*, 60, 481, 1973.
 - 19- Madavan, N.K.; Merkel, C.L.; Deutsch, S., *J. of Fluid Eng.*, 107,370,1985.
 - 20- Patterson, G.K.; Zakin, J.L., *Ind. Eng. Chem.*, 61,1,1969.
 - 21- Stone, J.P.; Mckinzie, J., *NASA Tech. Memo.*
 - 22- Tiederman, W.G.; Luchick, T.S., *J. Fluid Mech.*, 190,240,1988.
 - 23- Townsend, A.A., "Turbulent shear flow, cambridge University press, 1956.
 - 24- Wells, C.S.; Spangler, J.G., *Phys. Fluids*, 10,1990,1967.
- ۲۵- راد، م.، فیروزآبادی، ب. و حکیم جوادی، م.، "طراحی بهینه هیدرودینامیکی بدنه سفینه‌های آبی" پروژه تحقیقاتی دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف، بهمن ۱۳۷۰.