

تعیین تابع ساختار پروتون در Q^2 های کوچک و بزرگ

قاسم فروزانی*، مهنا نجفی

دانشگاه بوعلی سینا، گروه فیزیک

چکیده

در این مقاله توابع ساختار پروتون در بازه‌های مختلف Q^2 محاسبه شده‌اند. توابع ساختار F_L و F_2 در Q^2 های بزرگ با استفاده از نتایج دو آزمایش پراکندگی غیر کشسان عمیق خنثی e^+p بدست آمده‌اند. این آزمایشها با استفاده از آشکارساز HI در HERA، در انرژیهای مختلف انجام شده‌است. نتایج بدست آمده در اینجا سازگاری خوبی با روش برازش (Next To Leading Order) در x های کوچک از خود نشان می‌دهند. در Q^2 های کوچک ($Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$) توابع ساختار F_L و F_2 از یک روش تقریبی بدست آمده‌اند. این نتایج نیز با داده‌های آزمایشی برازش شده مقایسه شده‌اند. همچنین توابع ساختار F_2 و $x F_3$ در Q^2 های بسیار بزرگ با استفاده از داده‌های سطح مقطع دو آشکارساز HI و ZEUS در انرژی‌های متفاوت استخراج و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. کلید واژگان: پراکندگی غیر کشسان عمیق، سطح مقطع پراکندگی، سطح مقطع کاهش یافته، تابع ساختار، برازش NLO.

۱. مقدمه

مشتق دوگانه سطح مقطع فرایندهای با جریان خنثی، $d^2\sigma/dx dQ^2$ ، برای پراکندگی غیر کشسان عمیق (DIS) الکترون (پوزیترون) - پروتون با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{2\alpha^2 Y_{\pm}}{x Q^4} \sigma_r, \quad (1)$$

که در این رابطه سطح مقطع کاهش یافته، σ_r ، برابر است با

$$\sigma_r^{e^+p} = F_2(x, Q^2) - \frac{y^2}{Y_+} F_L(x, Q^2) \mp \frac{Y_-}{Y_+} x F_3(x, Q^2), \quad (2)$$

و Y_{\pm} که از فاکتورهای سینماتیک پراکندگی است، عبارت است از $Y_{\pm} = 1 \pm (1-y)^2$. در این رابطه y متغیر ناکشسانی است که با رابطه $y = Q^2/sx$ بیان میشود. Q^2 (مربع تکانه انتقال یافته) و s (مربع انرژی مرکز جرم) وابسته می‌باشد. F_2 ، F_L و F_3 نیز توابع ساختار پروتون می‌باشند. برای برهم‌کنشهایی که فوتون

*forozani@basu.ac.ir

مجازی به صورت طولی و عرضی قطبیده است، توابع ساختار F_L و F_2 به سطح مقطع‌های σ_L و σ_T مربوط می‌شود [۱]. در Q^2 های کوچک، اثر $x F_3$ قابل چشم‌پوشی می‌باشد. همچنین F_L فقط در مقادیر بزرگ y مقدار قابل ملاحظه‌ای به خود می‌گیرد.

۲. تعیین F_L و F_2 در دوبازه مختلف از Q^2

با توجه به حذف $x F_3$ در معادله (۲) و اینکه در مقادیر ثابت x و Q^2 دو تابع ساختار F_L و F_2 ثابت می‌مانند، تغییرات سطح مقطع کاهش یافته تنها ناشی از تغییرات y است که به نوبه خود با s مرتبط است. با استفاده از نتایج آشکارساز H1 در HERA، سطح مقطع کاهش یافته در پراکندگی پوزیترون-پروتون اندازه‌گیری شده است [۳ و ۲]. با استفاده از این داده‌ها می‌توانیم با حل معادلات زیر، F_L و F_2 را در مقادیر Q^2 بین ۲۰۰ تا 800 GeV^2 بدست آوریم.

$$\sigma_{r(300)} = F_2(x, Q^2) - \frac{y^2(300)}{Y_{+(300)}} F_L(x, Q^2), \quad \sigma_{r(319)} = F_2(x, Q^2) - \frac{y^2(319)}{Y_{+(319)}} F_L(x, Q^2) \quad (3)$$

نتیجه برای F_L در شکل (۱) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود نتیجه حاصل با خطای آزمایشی بالا قابل مقایسه با محاسبات NLO-QCD می‌باشد. در شکل (۲) مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده برای F_2 و اندازه‌گیریهای H1، بر حسب Q^2 و در $x = 0.005$ انجام شده است. می‌توان F_L و F_2 را در Q^2 های کمتر با استفاده از روش دیگری بدست آورد. این روش که به مشتق سطح مقطع کاهش یافته مربوط می‌شود یک روش تقریبی است. تابع ساختار طولی F_L را می‌توان بر اساس پیش‌بینی QCD به صورت زیر نوشت [۴]:

$$F_L(x, Q^2) = \frac{\alpha_s(Q^2)}{\pi} \left[\frac{4}{3} \int_x^1 \frac{dy}{y} \left(\frac{x}{y} \right)^2 F_2(y, Q^2) + 2 \sum_i e_i^2 \int_x^1 \frac{dy}{y} \left(\frac{x}{y} \right)^2 \left(1 - \frac{x}{y} \right) x g(y, Q^2) \right], \quad (4)$$

که α_s ثابت جفت شدگی قوی و e_i بار کوارک i ام در واحد بار پرتون است. اگر انتگرالده را حول $x=0$ بسط تیلور بدهیم داریم:

$$xg(x, Q^2) = \frac{3}{5} 5.8 \left[\left(\frac{3\pi}{4\alpha_s} \right) F_L(0.417x, Q^2) - \frac{1}{1.97} F_2(0.75x, Q^2) \right] \quad (5)$$

از طرف دیگر با استفاده از نتایج روش Prytz Lo [۶]، می‌توان رابطه توزیع تکانه گلوئون را با مشتق F_2 نسبت به $\ln Q^2$ به صورت زیر نوشت.

$$xg(x, Q^2) \approx \frac{dF_2(x/2, Q^2)/d \ln Q^2}{(40/27)(\alpha_s/4\pi)} \quad (6)$$

با استفاده از معادله (۵) و (۶)، F_L به صورت مستقیم به F_2 و مشتق آن مربوط می‌شود.

$$F_L(x, Q^2) = \frac{6}{5.8} \frac{dF_2(1.2x, Q^2)}{d \ln Q^2} + 0.025 F_2(1.8x, Q^2) \quad (7)$$

در فرایند $e p \rightarrow e x$ ثابت جفت شدگی قوی $\alpha_s = 0.118 \pm 0.009$ می‌باشد [۷]. با جایگذاری رابطه (۷) در معادله (۲) و حذف $x F_3$ داریم:

$$\sigma_r = F_2(x, Q^2) - 0.025 \frac{y^2}{Y_+} F_2(1.8x, Q^2) - \frac{y^2}{Y_+} \frac{6}{5.8} \frac{dF_2(1.2x, Q^2)}{d \ln Q^2} \quad (8)$$

اگر به مقادیر σ_r در $x, 1/2x$ و $1/8x$ توجه کنیم متوجه رفتار مشابه توابع ساختار در x های مختلف می‌شویم. بنابراین داریم:

$$\sigma_r = F_2(x, Q^2) - \beta \frac{y^2}{Y_+} F_2(x, Q^2) - \gamma \frac{y^2}{Y_+} \frac{dF_2(x, Q^2)}{d \ln Q^2} \quad (9)$$

که $\gamma = 0.99$ و $\beta = 0.022$ می‌باشند. در رابطه بالا σ_r به F_2 و مشتق آن نسبت به $\ln Q^2$ مرتبط است. با استفاده از داده‌های سطح مقطع کاهش یافته ناشی از فرایند پراکندگی غیر کشسان عمیق پوزیترون-پروتون

[۸] و داده‌های $\frac{dF_2(x, Q^2)}{d \ln Q^2}$ در مرجع [۹] می‌توانیم F_L و F_2 را از روابط (۷) و (۹) استخراج کنیم.

نتایج محاسبات ما برای تابع ساختار F_2 در شکل (۳) با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در ZEUS در سالهای ۹۶-۹۷ و نمودار پیشنهادی NLO-QCD [۱۰] مقایسه شده است. این نمودار در $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$ در x های کوچک رسم شده است. نتایج برازش جهانی LO, NLO, NNLO برای F_L و همچنین روش برازش دوقطبی [۱۱] در شکل (۴) با نتایج محاسبات ما مقایسه شده‌اند. چنانچه نمودارها نشان می‌دهند نتایج بدست آمده برای F_L و F_2 توافق خوبی با پیش‌بینی‌های QCD دارند.

۳. تعیین F_2 و $x F_3$ در Q^2 های بزرگ

تابع ساختار $x F_3$ در Q^2 های بزرگ تأثیر قابل توجهی در سطح مقطع کاهش یافته دارد. در معادله (۲)، برای F_L های کوچک ($y < 1/6$)، قابل چشم‌پوشی است. با در نظر گرفتن دو دسته داده آزمایشگاهی برای σ_r در انرژی‌های مختلف می‌توانیم توابع ساختار F_2 و $x F_3$ پروتون را بدست آوریم. با استفاده از داده‌های آزمایش پراکندگی $e p$ و $e^+ p$ که توسط آشکار ساز H1 و ZEUS در HERA انجام شده است [۱۲ و ۱۳]، میتوان زیر توابع ساختار مورد نظر را از معادلات زیر استخراج نمود:

$$\sigma_{r(319)} = F_2(x, Q^2) - \frac{Y_{-(319)}}{Y_{+(319)}} x F_3(x, Q^2), \quad \sigma_{r(318)} = F_2(x, Q^2) - \frac{Y_{-(318)}}{Y_{+(318)}} x F_3(x, Q^2) \quad (10)$$

مقادیر بدست آمده برای F_2 و $x F_3$ در نمودارهای (۵) و (۶) رسم شده‌اند و چنانچه مشاهده می‌شود سازگاری خوبی بین این مقادیر و نتایج حاصل از HERA برای F_2 [۳] و $x F_3$ [۱۳] وجود دارد.

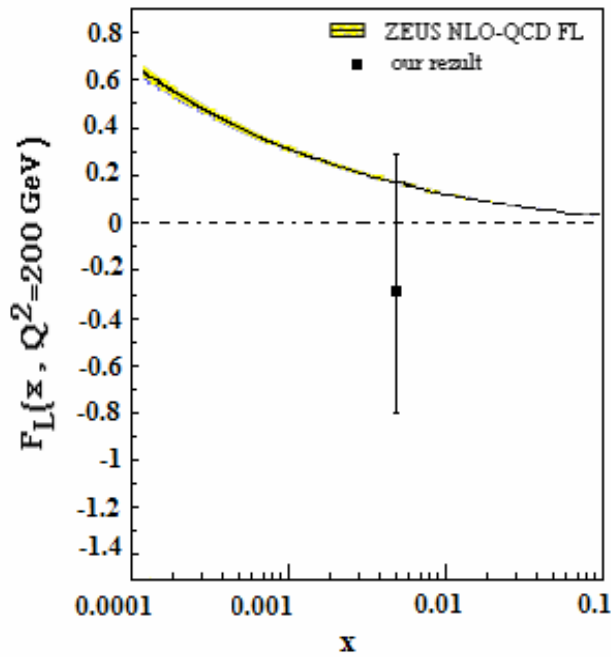
۴. نتیجه‌گیری

توابع ساختار بدست آمده در Q^2 و x کوچک، F_2 و F_L می‌باشند. که با یک روش تقریبی، با در نظر گرفتن رابطه بین σ_r و مشتق F_2 نسبت به $\ln Q^2$ بدست آمده‌اند. نتایج حاصل در توافق خوبی با نتایج

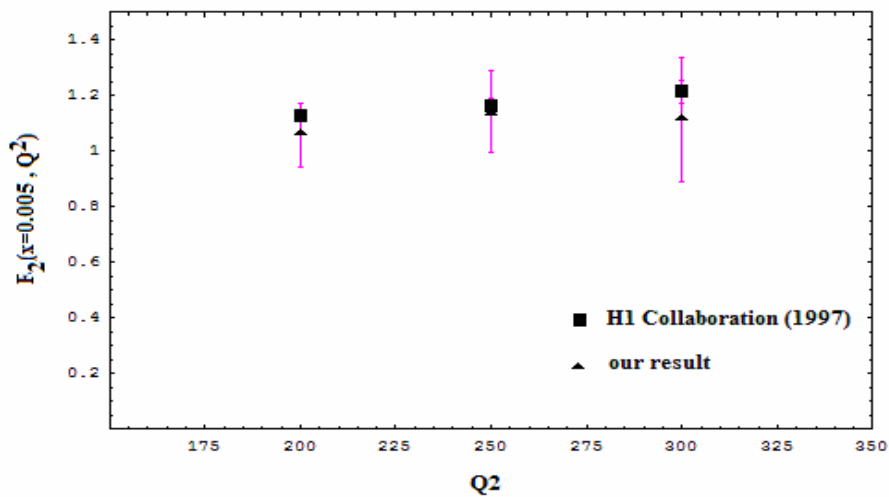
حاصل از برآزش‌های جهانی می‌باشد. اهمیت این روش در آن است که بدون داشتن هیچگونه اطلاعات قبلی از F_L می‌توان F_2 را بدست آورد. در Q^2 بزرگ و x کوچک، F_2 و F_L را با استفاده از ترکیب داده‌های موجود برای σ_r در انرژی‌های متفاوت استخراج و نتایج را با داده‌های آزمایشی مقایسه نمودیم. در Q^2 های بسیار بزرگ توابع ساختار F_2 و xF_3 را به روشی مشابه روش قبل بدست آوردیم که در این روش فقط با داشتن مقادیر σ_r در دو انرژی متفاوت می‌توان تابع ساختار مورد نظر را محاسبه نمود. در هر دو مورد مقادیر بدست آمده سازگاری خوبی با نتایج آزمایشی نشان می‌دهند.

۵. مراجع

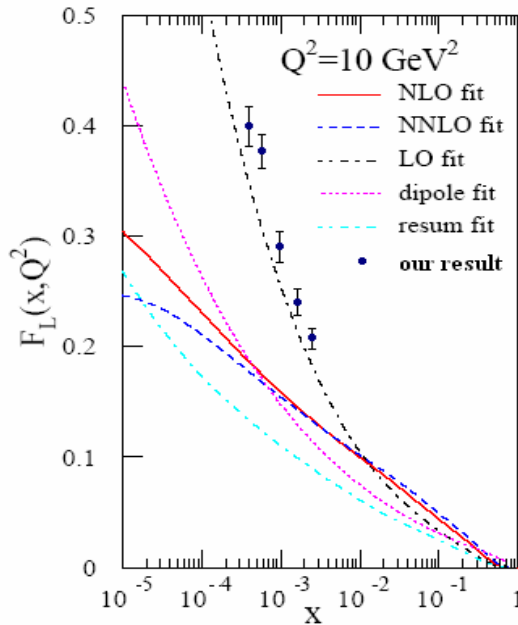
- [1] D.H. Perkins, Introduction to High Energy Physics, Addison–Wesley, 1982.
- [2] C. Adloff et al. [H1 Collaboration], Eur. Phys. J. C13 (2000) 609.
- [3] C. Adloff et al. [H1 Collaboration], Eur. Phys. J. C30 (2003) 1.
- [4] G Altarelli and G Martinelli, *Phys. Lett.* B76 (1978) 89.
- [5] A M Cooper-Sarkar, G Ingelman, K R Long, R G Roberts and D H Saxon, *Z. Phys.* C39 (1988) 281.
- [6] K. Prytz, *Phys. Lett. B* 311 (1993) 2861.
- [7] Lan Hinchliffe, Aneesh V. Manohar, *Ann.Rev.Nucl.Prat.Sci.* 50 (2000) 643-678.
- [8] S. Chekanov et al. [ZEUS Collaboration], *Eur. Phys. J. C* 21 (2001) 443.
- [9] J. Breitweg et al. [ZEUS Collaboration], *Eur. Phys. J. C* 7 (1999) 609.
- [10] http://www-zeus.desy.de/physics/sfew/PUBLIC/sfew_results/preliminary/dis01/sfewfits/index.html.
- [11] R.S. Thorne, the proceedings of “New Trends in HERA Physics 2005” Ringberg Castle, Tegernsee, October 2005, p. 359.
- [12] S. Chekanov et al. [ZEUS Collaboration], *Eur. Phys. J. C*28 (2003) 175-201.
- [13] N. Tuning, Proton structure functions at HERA, Ph.D. thesis, Univ. Amsterdam, 2001.



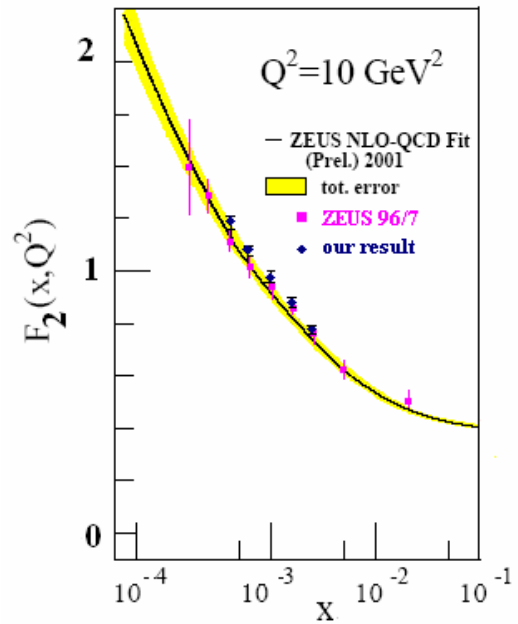
شکل ۱- مقایسه بین نتایج بدست آمده برای F_L در Q^2 بزرگ ($Q^2 = 200 \text{ GeV}^2$) و برازش ZEUS NLO-QCD



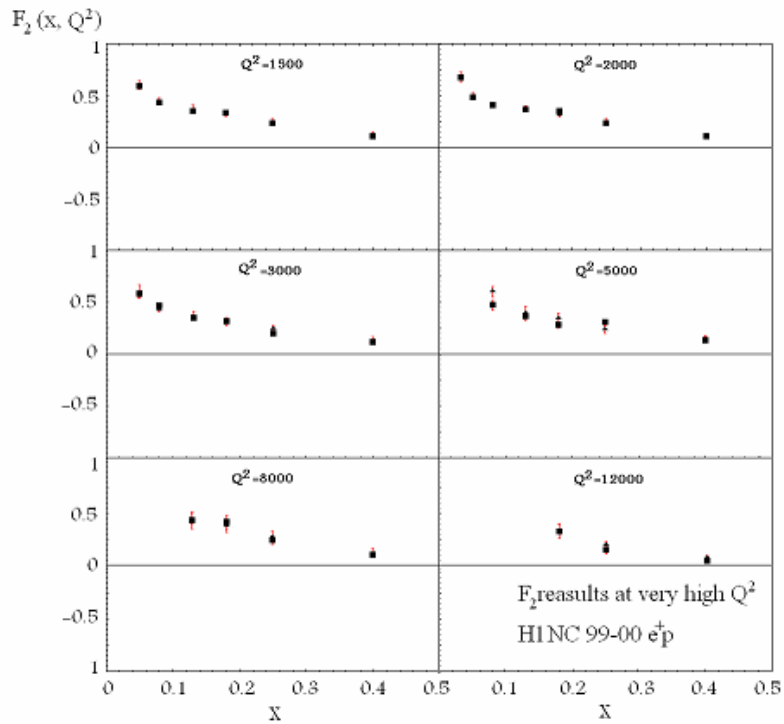
شکل ۲- مقایسه نتایج F_2 در x کوچک و $200 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 300 \text{ GeV}^2$ با اندازه‌گیری‌های H1 [۲]. خطاهای نشان داده شده خطاهای آماری هستند.



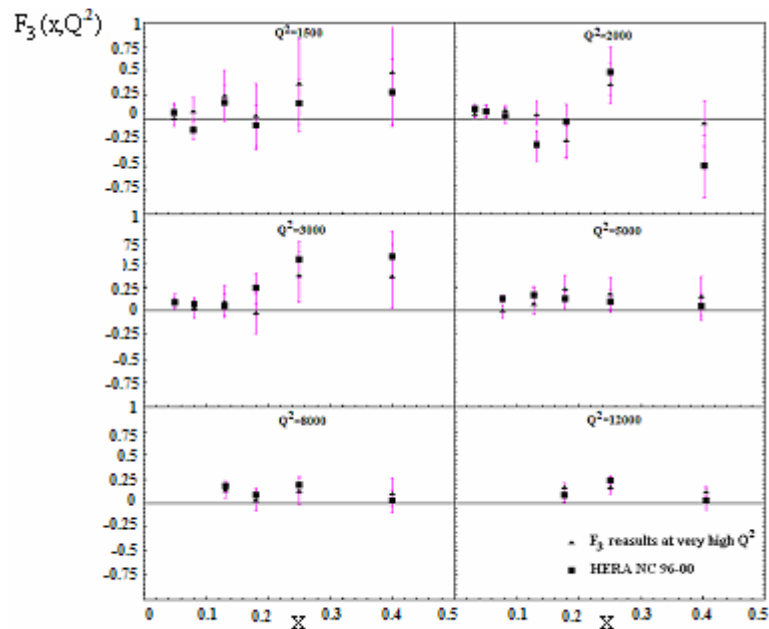
شکل ۴- پیش‌بینی‌های برازش جهانی در LO و NLO، و NNLO برای $F_L(x, Q^2)$ [۱۱] و مقایسه آن با مقادیر F_L با خطاهای آماری در $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$.



شکل ۳- $F_2(x, Q^2)$ پیش‌بینی‌شده در برازش ZEUS NLO-QCD [۱۰] که با نتایج بدست آمده در Q^2 کوچک ($Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$) مقایسه شده است خطاهای داده شده خطاهای آماری هستند.



شکل ۵- نتایج بدست آمده برای F_2 در Q^2 های بسیار بزرگ (با خطای آماری) و مقایسه آن با داده های تجربی [۱۲].



شکل ۶- نتایج بدست آمده برای F_3 در Q^2 های بسیار بزرگ (با خطای آماری) و مقایسه آن با داده های تجربی

[۱۴]HERA