بررسی و مقایسه چهار متغیر مقیاس‌بندی در فرآیند پراکندگی ناکشسان ژرف

عبدالغفاری، فتانه[۱]؛طاهری منفرد، سارا[۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

[۲]پژوهشکده فیزیک ذرات شتابگرها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی(IPM)، تهران

چکیده

در فرآیندهای پراکندگی ناکشسان ژرف، مقیاس‌بندی پدیده‌ای حائز اهمیت است، زیرا پیامد این واقعیت است که پروتون از اجزای نقطه‌گونه‌ای به نام پارتون‌ها (کوارک و گلوئون) تشکیل شده است. بنابراین با توجه به این اهمیت، در این مقاله چهار متغیر مقیاس‌بندی مختلف معرفی و نمودارهای این متغیرها را بر حسب بیورکن رسم کرده‌ایم. همچنین نمودار تابع ساختار اسپینی طولی را با وارد کردن اثر تصحیحات جرم هدف، برای هر چهار متغیر رسم و با هم مقایسه کرده‌ایم.

مقدمه‌ای بر پراکندگی ناکشسان ژرف

از لحاظ جنبشی‌شناسی فرآیند پراکندگی ناکشسان ژرف، فرآیندی است که در آن یک لپتون باردار یا خنثی مانند الکترون با یک پروتون برخورد می‌کند. لپتون با گسیل فوتون مجازی به پروتون ضربه زده و آن را می‌شکافد، این فوتون مجازی درون پروتون را کاوش می‌کند. در این فرآیند، بررسی و اندازه‌گیری ساختار پارتونی هادرون‌ها به وسیله توابعی به نام توابع ساختار F_1,F_2 و g_1,g_2 انجام می‌شود. توابع ساختار$F(x)$ اطلاعاتی را درباره توابع توزیع پارتونی فراهم می‌کنند. این توابع مشخص می‌کنند که هر کدام از پارتون‌ها چه کسری از تکانه پروتون را حمل می‌کنند. توابع ساختار قطبیده $\mathrm{g(x)}$، علاوه بر این اطلاعاتی را درباره نحوه توزیع اسپین هادرون هدف فراهم می‌کنند [۱]. x متغیر بیورکن نامیده می‌شود و به صورت $x=\frac{Q^2}{2M\nu}$ تعریف می‌شود که $Q^2=-q^2$، q^2 مربع چاربردار اندازه حرکت، M جرم نوکلئون مورد بحث و ν انرژی انتقال‌یافته به سیستم هادرونی است. در واقع پیش‌بینی بیورکن این بود که در انرژی‌های خیلی زیاد بستگی توابع ساختار ناکشسان ژرف بهq^2 کمرنگ و فقط تابعی از x می‌شوند. به عبارت دقیق‌تر او پیشنهاد کرد:

$$MW_1(q^2,x)\to F_1(x)$$

(۱)

$$-\frac{q^2}{2Mc^2}W_2(q^2,x)\to F_2(x).$$

این رفتار به مقیاس‌بندی[۱] معروف شد. اهمیت اساسی مقیاس‌بندی در این است که آزمون تجربی روشنی را برای مدل کوارک–پارتون فراهم می‌کند، آزمونی که آزمایش‌های پراکندگی ناکشسان ژرف را با موفقیت پشت سر گذاشته است. در محدوده مقیاس‌بندی بیورکن، فرض بر این است که کوارک‌ها ذراتی آزاد هستند و با یکدیگر برهم‌کنش ندارند. اما اگر انرژی را محدود در نظر بگیریم، کوارک‌ها می‌توانند گلوئون‌ها را جذب یا گسیل کنند و با یکدیگر برهم‌کنش داشته باشند. بنابراین توابع ساختار علاوه بر x، به q^2 نیز وابسته می‌شوند و این خود، دلیلی بر نقض مقیاس‌بندی بیورکن است و باعث می‌شود که نتایج حاصل از محاسبات با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی خوبی نداشته باشد. بنابراین امروزه برای ارائه تحلیلی دقیق‌تر از رفتار داده‌های آزمایشگاهی، متغیرهای مقیاس‌بندی دیگری نیز معرفی شده‌اند.

---

[1] scaling

معرفی متغیرهای مقیاس‌بندی

در این مقاله قصد داریم که علاوه بر متغیر مقیاس‌بندی بیورکن، سه متغیر مقیاس‌بندی دیگر را بررسی کنیم و با وارد کردن تصحیحات جرمی [۲] در این متغیرها و توابع ساختار اسپینی طولی، مقایسه‌هایی انجام دهیم. این سه متغیر عبارتند از: متغیر مقیاس‌بندی Nachtmann، Bloom-Gilman و Weizmann [۳].

رابطه متغیر Nachtmann به صورت زیر است [٤]:

$$\xi = 2x/(1+\sqrt{1+4x^2M^2/Q^2}), \qquad (۲)$$

که برای کوارک‌های بدون جرم و در Q^2 های کوچک برقرار است. با دقت در این رابطه متوجه می‌شویم در حدی که جرم هسته هدف به سمت صفر میل می‌کند، متغیر ناخمن با متغیر بیورکن برابر می‌شود. همچنین در Q^2 های کوچک و x های بزرگ، ξ مقدار قابل توجهی می‌شود. در واقع بسیاری از اطلاعات مربوط به توابع ساختار در این محدوده ذکر شده، نهفته است. یکی از مواردی که متغیر ناخمن اهمیت پیدا می‌کند، نظریه بسط ضرب عملگری است. این نظریه که اولین بار توسط ویلسون مطرح شد، برای ارائه یک تعریف معنادار از عملگرهای ترکیبی و از بین بردن واگرایی، به کار می‌رود و از نظر ریاضی بیان می‌کند که ضرب دو جریان ناشی از برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی یا ضعیف را می‌توان به صورت بسط سری نوشت [٥].

متغیر مقیاس‌بندی Bloom-Gilman هم با استفاده از قوانین جمع انرژی متناهی به دست می‌آید و رابطه‌ای به صورت زیر دارد [٦]:

$$x_{BG} = Q^2x/(Q^2+M^2x). \qquad (۳)$$

در اینجا، M جرم نوکلئون مورد بررسی و x_{BG} کمیتی بدون بعد است و در محدوده‌ای که بیورکن مد نظر داشت، یعنی q^2 های بزرگ و x های کوچک قابل تشخیص نبود و برای Q^2 های میانه به کار می‌رود که در مقایسه با M^2 خیلی بزرگ نیستند. متغیر مقیاس‌بندی Weizmann متغیری است که از طریق پایستگی انرژی در پراکندگی لپتون–نوکلئون به دست می‌آید و هر دو اثر تصحیحات جرم هسته هدف و جرم کوارک‌ها در این متغیر در نظر گرفته شده است. در واقع یک نگاه اجمالی نشان داد که به دلیل عوامل سینماتیکی و وجود سطح مقطع‌های طولی و عرضی، متغیر Bloom-Gilman برای مقادیر خیلی کوچک q^2 مناسب نیست. بنابراین برای اصلاح رابطه قبلی، متغیر Weizmann را تعریف می‌کنیم که تاثیری بر روی مقادیر میانه q^2 ندارد، اما برای مقادیر بسیار کوچک حائز اهمیت است. اگر فرض کنیم کوارک‌ها دارای جرم m هستند، این متغیر دارای رابطه‌ای به صورت زیر است [۷]:

$$x_w = (Q^2+m^2)x/(Q^2+M^2x). \qquad (٤)$$

با دقت در رابطه بالا، متوجه می‌شویم که اگر $m^2=0$ شود، متغیر Weizmann با متغیر Bloom-Gilman برابر می‌گردد. لازم به ذکر است که دو متغیر Bloom-Gilman و Weizmann از نظر پدیده‌شناختی بهتر از متغیر ناخمن هستند، اما از نظر استدلال تئوری دارای نقص‌هایی می‌باشند. از این رو استفاده از آن‌ها در محاسبات پدیده‌شناختی چندان مرسوم نیست [۳].

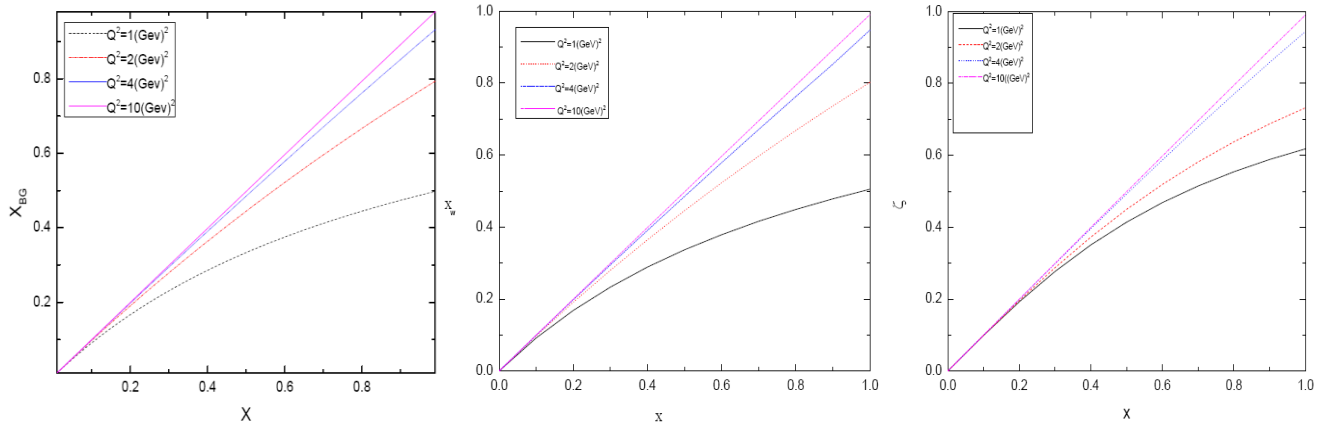
محاسبات

در ابتدا نمودارهای سه متغیر مطرح شده بر حسب متغیر بیورکن را به طور جداگانه و در مقادیر مختلف انرژی $Q^2 = 1,2,4,10$ در شکل ۱ ارائه کردیم.

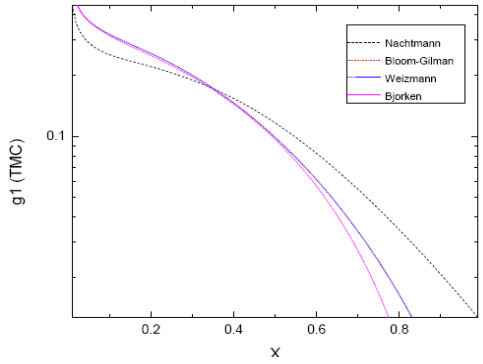
در شکل ۲، اثر تصحیحات جرمی هسته هدف در تابع ساختار طولی g_1 را بر حسب هر چهار متغیر در $Q^2 = 5$ بررسی و با هم مقایسه کردیم. شکل ریاضی این تابع به صورت زیر است:

$$g_1(x,Q^2) = \frac{1}{2}\sum_q e_q^2\{\delta q(x,Q^2) + \delta\bar{q}(x,Q^2) + \frac{\alpha_S(Q^2)}{2\pi}[\delta c_q \otimes (\delta q + \delta\bar{q}) + 2\delta c_g \otimes \delta g],\qquad (۵)$$

که δq، $\delta\bar{q}$ و δg به ترتیب چگالی‌های قطبیده کوارک، آنتی‌کوارک و گلوئون در پروتون هستند و $\delta c_{q,g}$ هم توابع ضریب ویلسون وابسته به اسپین هستند. برای رسم این نمودار از نتایجی استفاده کردیم که در آن برازش داده‌ها بر روی توابع ساختار اسپینی طولی پروتون، نوترون و دوترون انجام شده و اثر تصحیحات جرم هدف و پیچش‌های مراتب بالاتر در نظر گرفته نشده‌اند [۸].



شکل(۱): نمودار هر سه متغیر بر حسب بیورکن



شکل(۲): نمودار تابع ساختار اسپینی طولی چهار متغیر بر حسب بیورکن

نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی بر این داشتیم که در ابتدا مقایسه‌ای بین چهار متغیر مقیاس‌بندی داشته باشیم و به این نتیجه رسیدیم که متغیر استاندارد همان متغیر بیورکن است، اما از آنجایی که تاثیر جرم هدف و جرم کوارک‌ها در این متغیر در نظر گرفته نشده‌اند، به مطالعه دیگر متغیرهای مقیاس‌بندی پرداختیم. از بین این سه متغیر، ناخمن معروف‌ترین است، زیرا تنها متغیری است که می‌توان آن را از لحاظ تئوری، از طریق پایستگی انرژی در پراکندگی شبه‌الاستیک لپتون–کوارک درک کرد. در پایان، تابع ساختار اسپینی طولی را برای هر چهار متغیر بر حسب متغیر بیورکن در انرژی پایین رسم و با هم مقایسه کردیم. گام بعدی ما، بررسی اثر این متغیرها در فرآیند برازش داده‌های تجربی است.

مراجع

[1] Y.B.Dong. *Phys. Lett***. B641**.(2006). 272-277.
[2] Ingo Schienbein et al. J. *Phys*. G: Nucl. Part. *Phys*. **35**(2008). 053101.
[3] Ma. Bo-Qiang.*Phys. Lett*. **B176**. (1986). 179-184.
[4] O. Nachtmann, Nucl. *Phys*. **B 63** (1973) 237.
[5] Kenneth G. Wilson. *Phys. Rev*. **179**(1969). 1499-1512.
[6] E.D. Bloom and F.J. Gilman, *Phys. Rev. Lett*. **25** (1970) 1140; *Phys. Rev*. **D4** (1971) 2901.
[7] V. Rittenberg and H.R. Rubinstein, *Phys. Lett*. **B35** (1971) 50.
[8] Ali N. Khorramian et al. *PhysRev*. **D83**. (2011) 054017.